

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Matej Krajinović**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentori:

Dr. sc. Marino Grozdek

Student:

Matej Krajinović

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Marinu Grozdeku na pokazanom strpljenju i stručnoj pomoći pri izradi rada i odabiru literature.

Zahvaljujem se prijateljima koji su mi uljepšali i olakšali studiranje.

Najviše se zahvaljujem svojoj obitelji, naročito svojim roditeljima na ukazanom povjerenju, strpljenju i moralnoj podršci.

Matej Krajinović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodogradarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matej Krajnović**

Mat. br.: **0035185520**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Zamjena radne tvari HCFC-22 s propanom R-290 u split rashladnom uređaju**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Retrofitting of R-22 split air-conditioner with natural refrigerant propane (R-290)**

Opis zadatka:

Potrebno je detaljno razraditi način zamjene HCFC radne tvari R-22 s propanom kao prirodnom radnom tvari u postojećem split rashladnom uređaju rashladnog učinka 3,5 kW.

U radu je potrebno:

- Teoretski obraditi način postupka provedbe postupka zamjene radne tvari R-22 s propanom s posebnim naglaskom na sigurnost.
- Provesti termodinamički proračun procesa u uređaju prije i nakon provedbe postupka zamjene.
- Nacrtati shemu postojećeg rashladnog uređaja s prikazom svih linijskih, elektroničkih i regulacijskih elemenata.
- Nacrtati shemu rashladnog uređaja nakon provedbe postupka zamjene radne tvari s naznakom svih elemenata (linijskih, elektroničkih i regulacijskih) koje je potrebno zamijeniti.
- Napraviti troškovnik.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

**1. rok:** 25. veljače 2016

**2. rok (izvanredni):** 20. lipnja 2016.

**3. rok:** 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 29.2., 02. i 03.03. 2016.

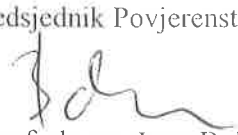
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2016.

**3. rok:** 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Marino Grozdek

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
1. UVOD.....	1
1.1. Osnovni principi i upozorenja .....	1
1.2. Razmatranja o provedbi konverzije sustava .....	2
2. PROPAN KAO ZAMJENSKA RADNA TVAR ZA R-22.....	4
2.1. Kompatibilnost propana .....	4
2.2. Termodinamička svojstva propana u odnosu na R-22 .....	4
3. SIGURNOSNE MJERE I UPOZORENJA .....	12
3.1. Osnovna podjela prema EN378-1 i ograničenja.....	12
3.2. Zapaljivost propana .....	14
3.3. Dozvoljena količina punjenja sustava prema EN378-1 .....	15
3.4. Koncentracijska granica propana .....	17
3.5. Maksimalna dozvoljena količina propana u sustavu.....	18
3.6. Postupci konstruiranja sustava koji koristi zapaljive radne tvari .....	18
4. PROCES PROVEDBE KONVERZIJE SUSTAVA .....	22
4.1. Primjer konverzije split rashladnog uređaja s R-22 na R-290.....	22
4.2. Dijagram provođenja konverzije sustava .....	31
4.3. Osnovne upute i promjene na konstrukciji sustava .....	33
5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN PROCESA.....	34
5.1. Određivanje točaka procesa.....	34
5.1.1. Proračun sustava s R-22 .....	36
5.1.2. Proračun sustava s propanom (R-290) .....	38
5.2. Usporedba radnih karakteristika propana (R-290) i R-22 .....	40
6. TROŠKOVNIK .....	41
ZAKLJUČAK .....	42
LITERATURA.....	43
PRILOZI.....	44

## POPIS SLIKA

Slika 1 Krivulja zasićenja propana i radne tvari R-22 .....	5
Slika 2 Toplina isparivanja propana i radne tvari R-22 .....	6
Slika 3 Gustoća propana i radne tvari R-22 .....	7
Slika 4 Kompresijski omjer propana u odnosu na R-22 pri razlici temperatura između kondenzacije i isparivanja od 40 °C .....	7
Slika 5 Volumetrički rashladni učin u odnosu na temperaturu isparivanja,.....	8
Slika 6 Volumetrička potrošnja energije u odnosu na R-22 ovisno o temperaturi .....	9
Slika 7 Utjecaj pothlađenja na COP, pri temperaturi kondenzacije 40 °C,.....	9
Slika 8 Utjecaj pregrijanja na COP, pri temperaturi kondenzacije 40 °C,.....	10
Slika 9 Temperatura na izlazu iz kompresora u odnosu na temperaturu isparivanja, .....	11
Slika 10 Dozvoljeni pristup .....	13
Slika 11 Smještaj opreme .....	13
Slika 12 Znakovi zabrane i opasnosti .....	20
Slika 13 ISO naljepnica .....	21
Slika 14 Primjer naljepnice za sustave sa zapaljivom radnom tvari .....	21
Slika 15 Pločica s podacima.....	22
Slika 16 Procjena ekvivalentne količine punjenja radne tvari R-290 .....	23
Slika 17 Vanjska jedinica , Slika 18 Unutarnja jedinica .....	23
Slika 19 Najviša dopuštena količina radne tvari za postojeću veličinu prostora .....	24
Slika 20 Mehanički spoj u zoni boravka , Slika 21 Uklanjanje mehaničkih spojeva .....	25
Slika 22 „Lok-ring“ spojnica , Slika 23 Spajanje cijev s „Lok-ring“ .....	25
Slika 24 Provjera izvora plamena.....	26
Slika 25 Žičani spojevi i izolacija .....	26
Slika 26 Izolacijska kutija .....	26
Slika 27 Tlačna proba .....	27
Slika 28 Privremeno zapaljiva zona .....	28
Slika 29 Vakumiranje sustava .....	28
Slika 30 Punjenje sustava .....	29
Slika 31 Oprema za vakumiranje i punjenje sustava .....	29
Slika 32 Provjera propuštanja mjehurićima , Slika 33 Elektronični detektor plina .....	30
Slika 34 Označavanje vanjske jedinice .....	30
Slika 35 Dijagram toka provedbe konverzije sustava .....	32
Slika 36 Primjer provjere potencijalnih izvora plamena, konstrukcijskih izmjena,.....	33
Slika 37 Shema rashladnog sustava .....	34
Slika 38 T – s dijagram za R-22 .....	36
Slika 39 log p – h dijagram za R-22 .....	36
Slika 40 T – s dijagram za R-290 .....	38
Slika 41 log p – h dijagram za R-290 .....	38

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Pokazatelj prikladnosti korištenja HC radnih tvari u sustavima .....	3
Tablica 2 Svojstva radnih tvari propana i R-22 .....	5
Tablica 3 Svojstva zapaljivosti propana .....	14
Tablica 4 Sigurnosna klasifikacija radnih tvari .....	14
Tablica 5 Klase toksičnosti .....	14
Tablica 6 Klase zapaljivosti .....	15
Tablica 7 Dozvoljena količina radne tvari prema EN 387-1 – Sigurnosna grupa A3 .....	17
Tablica 8 Postupak osiguravanja HC sustava .....	19
Tablica 9 Svojstva radne tvari R-22 za odabrane temperature .....	37
Tablica 10 Svojstva propana (R-290) za odabrane temperature .....	39
Tablica 11 Izračunate radne karakteristike propana (R-290) i R-22 .....	40

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

0035185520-001	Shema sustava s R-22
0035185520-002	Shema sustava s propanom



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$c_p$	(J/kgK)	- specifični toplinski kapacitet
$J$	(J/kg)	- specifična entalpija
$p$	(Pa)	- tlak
$P_{el}$	(kW)	- električna snaga kompresora
$r$	(kJ/kg)	- specifična toplina isparivanja
$s$	(kJ/kgK)	- specifična entropija
$\dot{m}_{RT}$	(kg/s)	- maseni protok radne tvari
$\dot{V}_{RT}$	(m <sup>3</sup> /kg)	- volumni protok radne tvari
$q_o$	(kJ/kg)	- specifični rashladni učinak
$q_o v_1$	(kJ/m <sup>3</sup> )	- volumetrički rashladni učinak
$Q_o v_1$	(kJ/m <sup>3</sup> )	- volumetrička potrošnja energije
$\varepsilon$	(-)	- faktor hlađenja
$\eta_k$	(-)	- izentropski stupanj djelovanja kompresora
$\vartheta$	(°C)	- temperatura
$\vartheta_i$	(°C)	- temperatura isparivanja
$\vartheta_k$	(°C)	- temperatura kondenzacije
$\vartheta_p$	(°C)	- temperatura pothlađenja
$\lambda$	(W/mK)	- koeficijent toplinske vodljivosti
$\rho$	(kg/m <sup>3</sup> )	- gustoća
$\rho_1$	(kg/m <sup>3</sup> )	- gustoća radne tvari na usisu u kompresor
$\Phi_o$	(kW)	- učinak isparivača
$\Phi_k$	(kW)	- učinak kondenzatora

## SAŽETAK

Prirodne radne tvari su među prvim radnim tvarima koje su se koristile za mehaničke sustave hlađenja. Kada su razvijene CFC i HCFC radne tvari upotreba prirodnih radnih tvari se smanjila. Zbog oštećivanja ozonskog sloja i visokog GWP-a CFC i HCFC radne tvari su izbačene. Iz istog razloga sustavi koji su koristili HCFC radne tvari zamjenjuju se prirodnim radnim tvarima, prvenstveno ugljikovodicima (HC), taj postupak se zove konverzija sustava i ona je trenutno u porastu u svijetu. Split rashladni uređaji su u uporabi diljem svijeta i uglavnom se u njima nalazi radna tvar R-22. Zamjenska radna tvar bi trebala imati što sličnija svojstva radnoj tvari koja se zamjenjuje uz što manje preinake postojećeg sustava. Idealna zamjenska tvar za R-22 je propan (R-290) jer ima odlična termofizikalna svojstva, bolju energetska učinkovitost i potrebne su male preinake u sustavu. Problem s propanom i općenito sa ugljikovodicima je taj što su vrlo zapaljivi i eksplozivni. Prema tome pri provedbi procesa konverzije jako je bitno posvetiti se ispunjavanju sigurnosnih uvjeta i normi. Kada su ispunjeni zakonom propisani uvjeti za sigurnost, propan je idealna zamjenska radna tvar. U prvom dijelu rada su prikazana termofizikalna svojstva propana u odnosu na R-22, kasnije su prikazani koji su to sigurnosni uvjeti i norme koje moraju biti ispunjene. Na kraju se nalazi termodinamički proračun sustava s propanom i R-22 i njihova usporedba. Na crtežima su prikazane sheme rashladnog sustava s propanom i R-22, te potrebne konstrukcijske izmjene.

Ključne riječi: prirodne radne tvari, propan, R-22, konverzija, sigurnost

## **SUMMARY**

Natural refrigerants are among the first refrigerants to be used for mechanical cooling systems. After development of CFC and HCFC refrigerants, use of natural refrigerants reduced. Because of the damage to the ozone layer and the high GWP of CFC and HCFC, refrigerants were phased out. For the same reason, systems which used HCFC refrigerants were replaced with natural refrigerants, mainly hydrocarbons (HC). This procedure is called system conversion and it is increasing throughout the world. Split cooling systems are in use around the world and usually contain the refrigerant R-22. Replaced refrigerants should have similar properties to refrigerants being replaced with minimum modifications of the existing system. The ideal alternative substance for the R-22 is propane (R-290), because it has excellent thermophysical properties, is more energy efficient and requires small modifications in the system. The problem with propane and generally with hydrocarbons is that they are highly flammable and explosive. In the implementation of the conversion process, it is very important to follow the safety conditions and standards. When statutory requirements for safety are met, propane is an ideal replacement refrigerant. The first part of this work presents the thermophysical properties of propane compared to R-22. The second part presents which safety conditions and standards should be met. The end contains thermodynamic calculations and the comparison between systems with propane and R-22. The drawings at the end show the scheme of the cooling system with propane and R-22, including the necessary structural changes.

Key words: natural refrigerants, propane, R-22, conversion,

## 1. UVOD

Trenutno je 1 milijarda klorofluorouglikovodičnih (eng. HCFC) sobnih klima u upotrebi širom svijeta, više od 100 milijuna jedinica se dodaje svake godine zbog povećane potražnje [3]. Svaka jedinica sadrži prosječno 1,6 kg radne tvari, uglavnom R-22 [3]. Potencijal globalnog zagrijavanja eng. The Global Warming Potential (GWP) R-22 je 1810, što je ekvivalent od skoro 3,000 metričkih tona emisije CO<sub>2</sub>[3]. Serviseri zahtijevaju 800,000 tona R-22 svake godine, što je ekvivalentno 1450 metričkih tona CO<sub>2</sub> godišnje [3]. Kao odgovor na utjecaj okoliša radne tvari R-22, prvenstveno smanjenja ozona i globalnog zagrijavanja, korištenje prirodnih radnih tvari se sve više primjenjuje diljem svijeta. Od svih prirodnih radnih tvari, ugljikovodici (HC) se najviše koriste u novim rashladnim sustavima.

Pod određenim okolnostima, postoji potreba za konverzijom rashladnih sustava i klima uređaja koji koriste ne zapaljive radne tvari za hlađenje u ugljikovodične sustave i uređaje. Ovaj proces se koristi iz više razloga, kao što su:

- Potreba za poboljšanjem učinkovitosti sustava
- Smanjenje utjecaja na okoliš
- Ekonomska isplativost korištenjem alternativnih radnih tvari
- Zbog toga što nema mnogo drugih alternativa

Radna tvar koja se može koristiti za te svrhe je propan (R-290) i najbolja je zamjena za R-22 u postojećim sustavima jer su termofizikalna svojstva tih radnih tvari približno jednaka. Naravno, ako postojeći rashladni sustavi rade adekvatno, tada nema potrebe za konverzijom sustava ili korištenja zamjenskih radnih tvari.

Preinaka sustava iz klorofluorouglikovodika (HCFC) na fluorirani ugljikovodik (HFC) obično zahtijeva osnovne preinake sustava. Međutim, konverzija sustava koji koristi nezapaljivu radnu tvar u sustav koji koristi zapaljive radne tvari mora zadovoljiti određene uvjete i norme, koji su prikazani ovdje.

### 1.1. Osnovni principi i upozorenja

Kada se upotrebljavaju zapaljive radne tvari u sustavima koji obično koriste nezapaljive radne tvari, tada se koristi termin "pretvorba" ili konverzija. Bitno ga je razlikovati od termina kao što su „nadopuna“ (eng. re-fill), „zamjena“ (eng. drop-in) te „preinaka“ (eng. retrofit), jer kad se nezapaljiva radna tvar zamijeni s drugom nezapaljivom radnom tvari, te ako je potrebno

prepravljati sustav, tada se to odnosi na pojedinosti ( npr. promjena duljine kapilarnih cijevi) ili kompatibilnost sustava (npr. promjena vrste ulja za podmazivanje kompresora). Međutim, kada se vrši konverzija s nezapaljive radne tvari (npr. R-22) na zapaljive, HC radne tvar (npr. R-290), tada se dodatna razmatranja trebaju uzeti u obzir. To uključuje utvrđivanje može li se HC radna tvar koristiti, a pri tome zadovoljiti sigurnosne uvjete. Potrebno je promijeniti opremu koja može dovesti do iskrenja kako bi što više umanjili rizik od mogućnosti zapaljenja. Promjena s nezapaljive na zapaljive radne tvari treba shvatiti u smisli konverzije cijele opreme, ne samo radne tvari.

Treba naglasiti da pri provedbi konverzije sustava da koristi zapaljivu radnu tvar treba pažljivo rukovati i razmotriti koje moguće opasnosti takav sustav nosi. Ako se na kraju vrši konverzija sustava, tada se ona treba napraviti opsežno, s pažnjom na detalje. Treba razumjeti da se konverzija može izvršiti samo ako završni proizvod ispunjava zahtijevane sigurnosne standarde i zakonske regulative.

## 1.2. Razmatranja o provedbi konverzije sustava

Kada odlučimo provesti konverziju sustava bitno je da ona zadovoljava sigurnosne mjere, a pitanja koja moramo uzeti u obzir su:

- Vrsta i složenost opreme koja se izmjenjuje
- Okoliš i mjesto na kojem se oprema instalira
- Količine radne tvari (u odnosu na lokaciju sustava)
- Jednostavnost i mogućnost promjene dijelova sustava
- Jednostavnost i mogućnost rukovanja potencijalno zapaljivim izvorima
- Potreba vlasnika da razumije da se više ne radi o nezapaljivim radnim tvarima

Ugljikovodici se odlikuju izvrsnim termofizikalnim svojstvima, ali se zbog njihove zapaljivosti preporučuje rabiti ih samo u manjim dobro brtvljenim jedinicama s malom količinom radne tvari, kao što su hladnjaci za kućanstvo i komercijalnu uporabu, dizalice topline i hladnjače kod kojih je moguće kontrolirati zdravstvene i sigurnosne rizike. Neke vrste sustava su idealne za korištenje zapaljivih radnih tvari, dok neki sustavi nikako ne bi smjeli koristiti zapaljive radne tvari . Tablica 1 vrlo jednostavno prikazuje koji sustavi su prikladni, a koji nisu.

Prikladnost korištenja HC radnih tvari prikazana je:

- 1** – sustavi su prikladni za korištenje HC radne tvari
- 2** – sustavi su prikladni, no postoje ograničenja kod maksimalno dozvoljene količine punjenja radne tvari ili koncentracijske granice
- 3** – sustavi se ne bi trebali koristiti s HC radnim tvarima

SUSTAV	PRIKLADNOST	SUSTAV	PRIKLADNOST
Integrirani sustavi, <150g radne tvari	1	Split klima uređaji	2
Integrirani sustavi, 150g do 1,5kg radne tvari,	2	Prijenosni klima uređaji	2
Integrirani izložbeni sustavi u supermarketima, ormari i vitrine, 150g do 1,5kg radne tvari, za smještaj na podu supermarketa	1	VRV/VRF sustavi	3
Hladne sobe ili podrum hlađen mono blok sustavom	2	Hladnjaci vode (i ostalih fluida)	2
Hladne sobe ili podrum hlađen prijenosnom kondenzacijskom jedinicom	3	Središnji sustav postrojenja	3
Sustav hlađenja s direktnom ekspanzijom	3	Postojeći CFC, HCFC i HFC sustavi	3

**Tablica 1** Pokazatelj prikladnosti korištenja HC radnih tvari u sustavima [5]

Preporučuje se da se proces konverzije sustava radi u posebnoj radionici koja je namijenjena baš za takve svrhe, sa odgovarajućim alatom i opremom. Postoji značajan broj prednosti tih radionica:

- Bolji pristup odgovarajućim alatima i opremi
- Radni prostor se može namjestiti za rukovanje zapaljivim radnim tvarima
- Potrebne mjere za puštanje u pogon HC-a će smanjiti posao na mjestu instalacije
- Više je vjerojatno da će stručni tehničari za rukovanje HC-ma biti prisutni
- Bolji i izravniji pristup odgovarajućim dijelovima i komponentama

## **2. PROPAN KAO ZAMJENSKA RADNA TVAR ZA R-22**

### **2.1. Kompatibilnost propana**

Osim izvrsnih termofizikalnih svojstava (koja su prikazana kasnije u tekstu), propan je kompatibilan s većinom materijala koji se tradicionalno koriste u opremi za hlađenje i dizalice topline.

Gotovo svi elastomeri i plastični materijali koji se koriste u rashladnoj tehnici, poput prstenova, sjedišta ventila, elastičnih brtvila i drugi, su kompatibilni s propanom. Materijali koji nisu kompatibilni s propanom su: prirodne gume, silikoni i PVC.

Propan kao radna tvar većinom je stabilan pri kontaktu s metalom. Može reagirati s metalom samo u nekim ekstremnim uvjetima, kao što su visoke temperature. Kompatibilan je s metalima kao što su: bakar, mjed, željezo, nikal, bronca, lijevani čelik, nehrđajući čelik, tantal, ugljični čelik, titan. No nije kompatibilan s cinkom, magnezijem, galvaniziranim metalima, aluminijskim legurama koje sadrže više od 2 posto magnezija.

Propan je potpuno kemijski kompatibilan s gotovo svim mazivima koja se obično upotrebljavaju u rashladnoj tehnici. S obzirom na izrazito dobru topivost s mineralnim uljima, potrebno je koristiti ulja s nižom topivosti ili povećanom viskoznošću kako bi se nadoknadilo moguće razrjeđivanje ulja i kako bi se osiguralo odgovarajuće podmazivanje kompresora. Propan je vrlo pogodan pri zamjeni s radnom tvari R-22 koji također radi s mineralnim uljima, te je nepotrebno bilo kakav postupak čišćenja kako bi se uklonili tragovi starog ulja.

Velika topivost može dovesti do pjenjenja ulja i pretjeranog razrjeđivanja ulja koje dalje uzrokuje habanje kliznih površina kompresora. Pjenjenje i habanje se sprječava uporabom specijalnih dodataka za ulje. Specijalni dodaci za ulje su često neki silikoni ili silikati koji nisu kompatibilni s propanom kao radnom tvari i ne bi se smjeli koristiti, pa treba biti oprezan.

### **2.2 Termodinamička svojstva propana u odnosu na R-22**

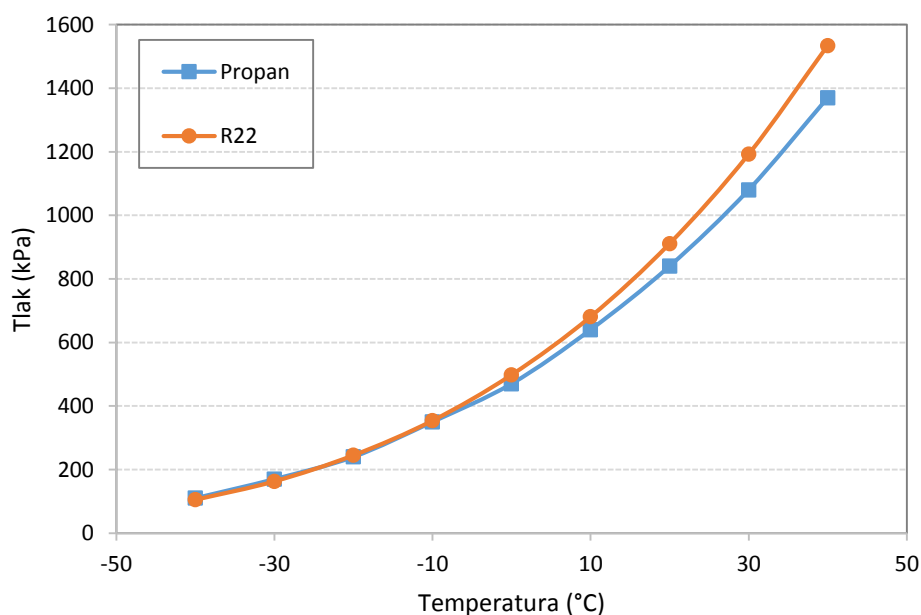
Propan ima odlična termodinamička svojstva za rad u rashladnim uređajima i jako je dobra zamjena za R-22. Normalno vrelište je temperatura pri kojoj je tlak pare tekućine jednak atmosferskom tlaku. Za radne tvari R-22 i R-290 normalna vrelišta su vrlo slična. Poželjno je da normalno vrelište tekućine bude što niže kako bi u sustavu radni tlakovi bili veći od

atmosferskog tlaka, u suprotnom može doći do ulaska vanjskog zraka u sustav, što je uvijek nepoželjno. Kritična točka, koja je definirana temperaturom i tlakom koji određuju granicu rada rashladnog kruga, približno je jednaka za R-22 i R-290. Svojstva su prikazana u Tablici 2.

Radna tvar	Propan	R22
Temperatura isparivanja pri atmosferskom tlaku [°C]	-42,09	-40,8
Latentna toplota isparivanja [kJ/kg]	425,6	233,95
Kritična temperatura [°C]	96,7	96,2
Kritični tlak [bar]	42,5	49,9

**Tablica 2 Svojstva radnih tvari propana i R-22 [6]**

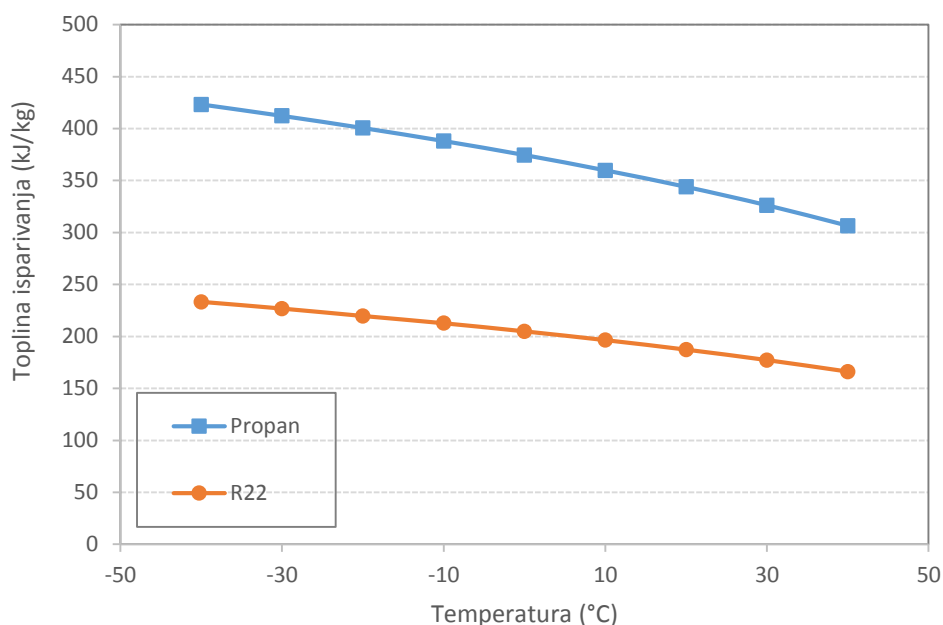
Odnos tlaka i temperature zasićenja pare radnih tvari prikazan je krivuljom zasićenja na sljedećoj slici ( Slika 1 ). Krivulje R-22 i propana su vrlo slične osim kod visokih temperatura gdje se lagano razilaze. Za jednake temperature propan zahtijeva nešto niže radne tlakove nego R-22, što znači da je propan prikladniji za rad pri višim temperaturama kondenzacije i imat će nižu temperaturu na izlazu iz kompresora.



**Slika 1 Krivulja zasićenja propana i radne tvari R-22**

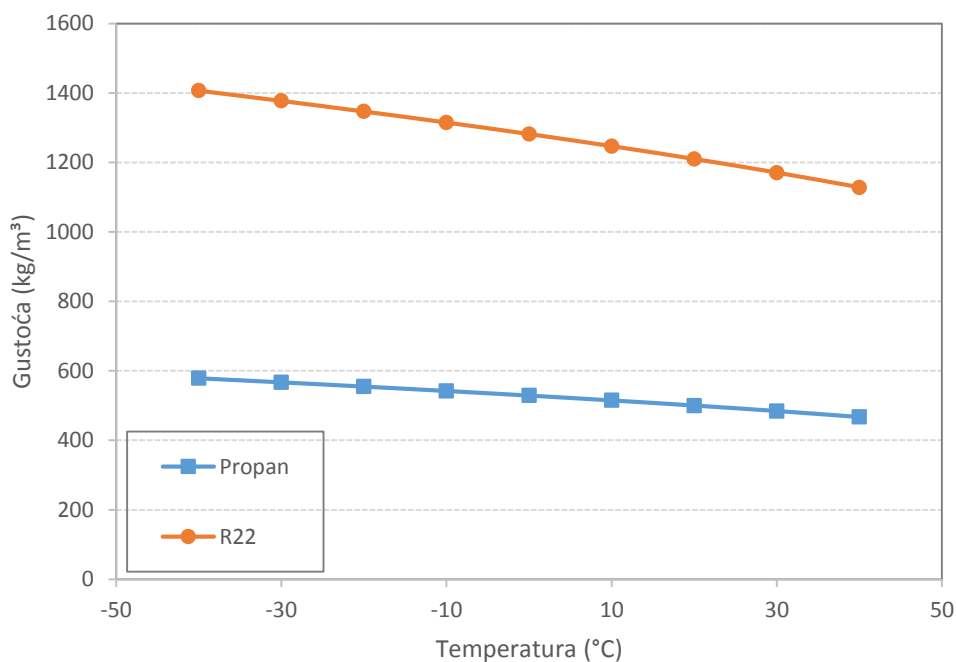


Toplina isparivanja je razlika entalpije između suhozasićene pare i vrele kapljevine za zadani tlak. Ta vrijednost određuje dostupnu toplinu kondenzacije ili isparivanja po kg tekućine. Propan ima dva puta veću latentnu toplinu isparivanja što znači da će maseni protok kroz rashladni sustav s propanom, za isti učin, biti upola manji nego za R-22.



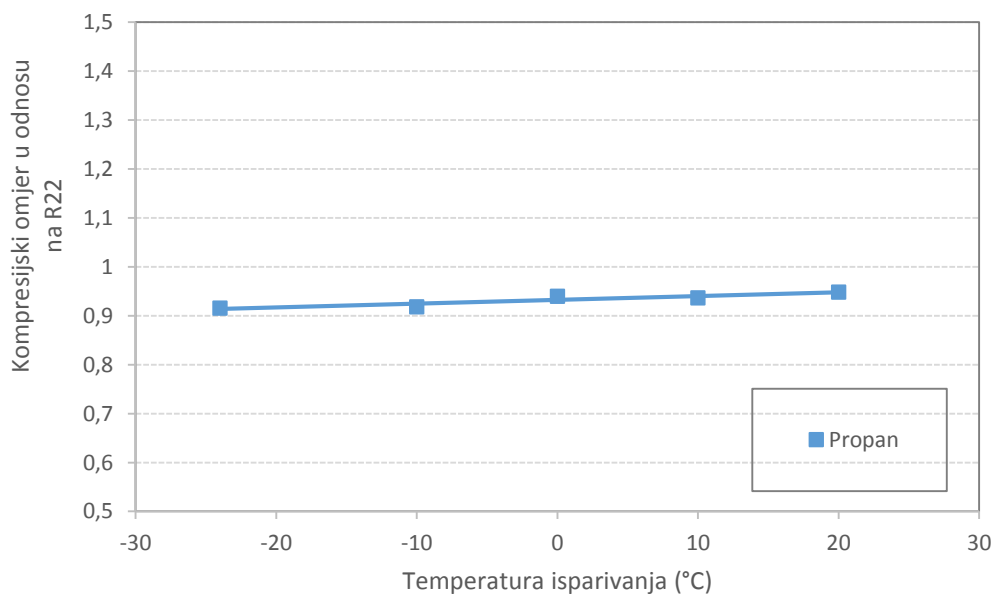
**Slika 2 Toplina isparivanja propana i radne tvari R-22**

Sljedeća Slika 3 prikazuje razlike u gustoći radnih tvari R-22 i propana ovisno o temperaturi. Propan ima oko 40 posto manju gustoću od R-22. Taj podatak možemo koristiti kao okvirno pravilo za procjenu punjenja sustava ako se sustav s radnom tvari R-22 zamjenjuje propanom. To znači da je ugrubo upola manje potrebno punjenje sustava s propanom nego što je potrebno za sustav s R-22. Manja gustoća radne tvari uzrokuje i manji pad tlaka duž izmjenjivača, manje cijevi i ventile.



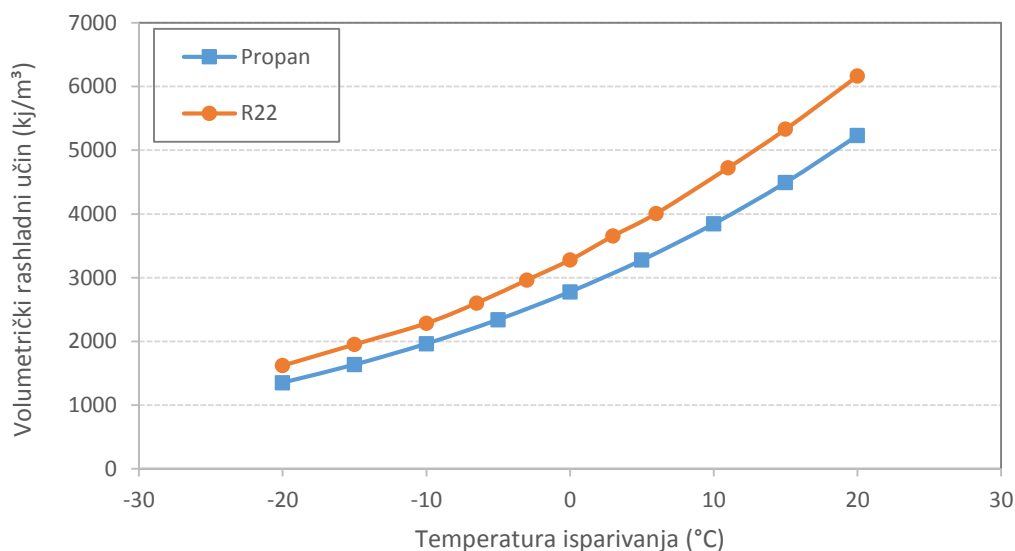
**Slika 3 Gustoća propana i radne tvari R-22**

Kompresijski omjer je omjer tlaka kondenzacije i tlaka isparivanja. Omjer tlakova utječe na učinkovitost kompresora i volumetrički stupanj djelovanja, što je kompresijski omjer niži to su sustavi učinkovitiji. Slika 4, koja prikazuje kompresijski omjer propana u odnosu na R-22, vidimo da propan ima manji kompresijski omjer, a time i niže radne tlakove u odnosu na R22. Zbog nižih radnih tlakova propan može postići više temperature kondenzacije.



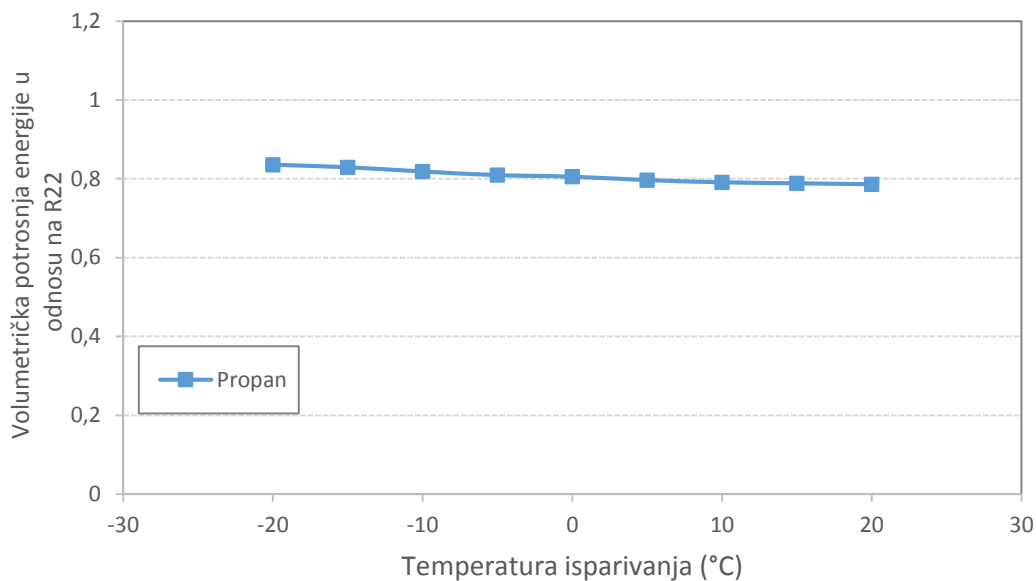
**Slika 4 Kompresijski omjer propana u odnosu na R-22 pri razlici temperatura između kondenzacije i isparivanja od 40 °C**

Volumetrički rashladni učin je svojstvo radne tvari i radne točke te se može odrediti kao umnožak gustoće na ulasku u kompresor i specifične razlike entalpije isparivača. Slika 5 prikazuje promjenu volumetričkog rashladnog učina s promjenom temperature isparivanja. Propan ima nešto niži volumetrički rashladni učin u odnosu na R-22 i imat će veće dimenzije kompresora. Za niže temperature isparivanja, volumetrički rashladni učin se smanjuje (manja gustoća na usisu u kompresor), to znači da pri nižim temperaturama isparavanja za isti rashladni učin volumen cilindra kompresora treba biti veći.



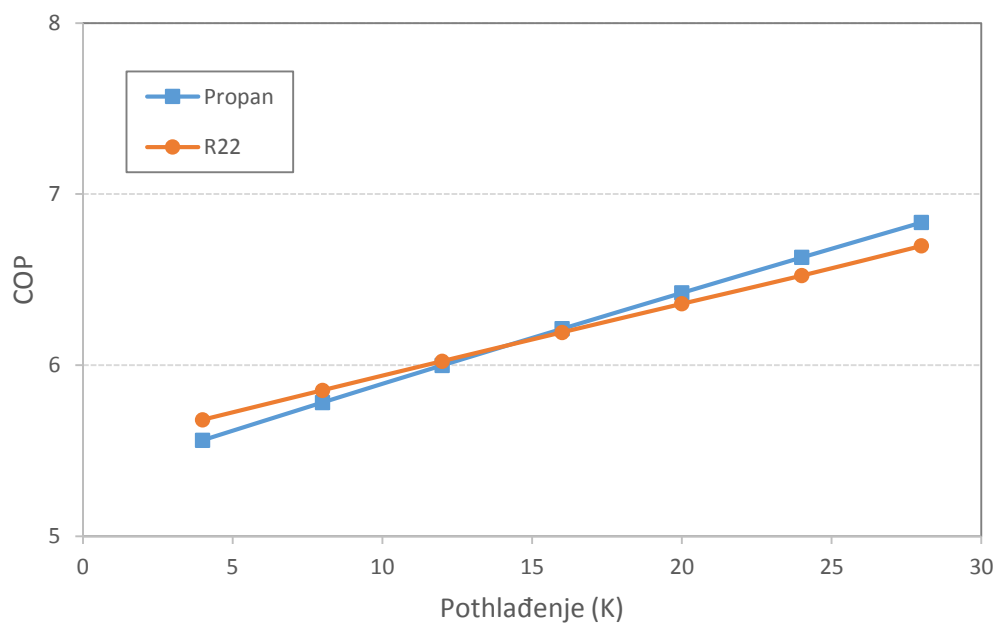
**Slika 5 Volumetrički rashladni učin u odnosu na temperaturu isparivanja, pri temperaturi kondenzacije 40 °C, 0 °C pothlađenja i 5 °C pregrijanja**

Volumetrička potrošnja energije definirana je kao potrebna izentropska snaga kompresora po jedinici volumnog protoka na usisu u kompresor. Slika 6 prikazuje vrijednost volumetričke potrošnje energije propana u odnosu na R-22, ovisno o temperaturi isparivanja. Propan zahtijeva oko 20 posto nižu potrošnju energije nego R-22 po jedinici protoka radne tvari, što znači da bi zamjenom R-22 propanom električni motor bio malo predimenzioniran.



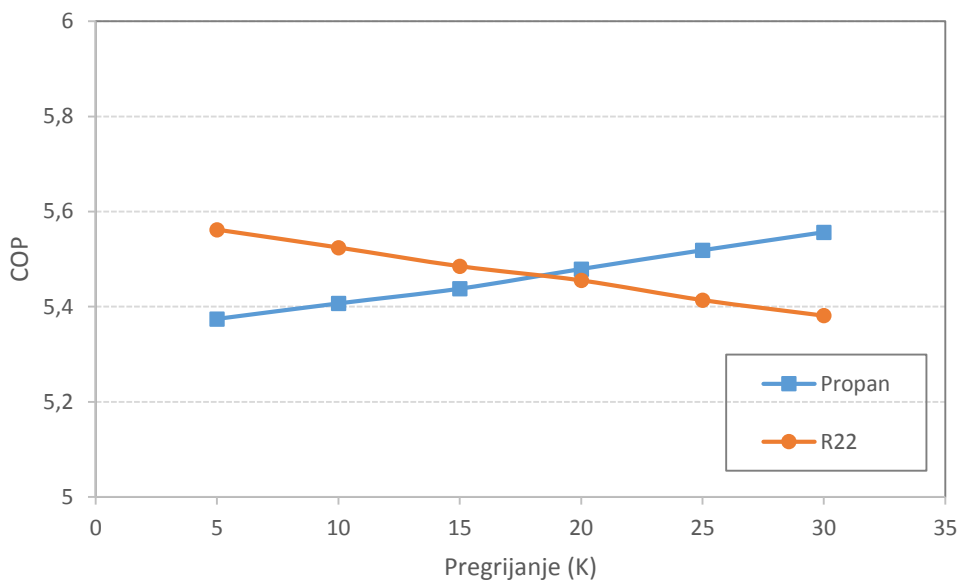
**Slika 6 Volumetrička potrošnja energije u odnosu na R-22 ovisno o temperaturi isparivanja, pri temperaturi kondenzacije 40 °C, 0 °C pothlađenja i 5 °C pregrijanja**

Pothlađivanje radne tvari povećava rashladni učin jer entalpija na ulazu u isparivač pada. COP je određen kao dobiveni rashladni učin na isparivaču kroz snaga kompresora, prema tome ako se pothlađenje poveća, povećat će se i COP. Slika 7 prikazuje utjecaj pothlađenja na COP. Vidim da je veći nagib krivulje propana nego R-22, što znači da će pothlađenje više utjecati na propan nego na radnu tvar R-22.



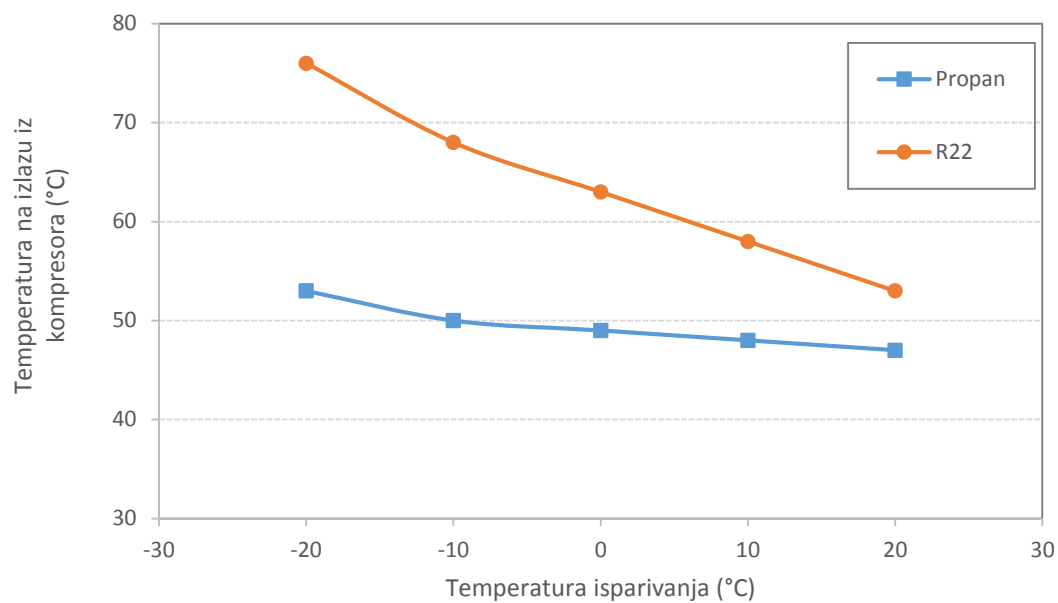
**Slika 7 Utjecaj pothlađenja na COP, pri temperaturi kondenzacije 40 °C, temperaturi isparivanja 0 °C i 5 °C pregrijanja**

Pregrijanje se vrši kao zaštita kompresora od hidrauličkog udara, tako da nikada tekuća radna tvar ne uđe u cilindar kompresora. Pregrijanje povećava specifični volumen na ulazu u kompresor te tako utječe na volumetrički učin i volumetričku potrošnju energije. Slika 8 prikazuje utjecaj pregrijanja na COP. Propan ima pozitivan nagib krivulje i skroz mali porast COP-a, a R-22 negativan nagib krivulje i mali pad COP-a.



**Slika 8 Utjecaj pregrijanja na COP, pri temperaturi kondenzacije 40 °C, temperaturi isparivanja 0 °C i 0 °C pothlađenja**

U praksi veće pregrijanje unutar isparivača zahtjeva sve niže temperature isparivanja, što dovodi do povećanja kompresijskog omjera, veće temperature na izlazu iz kompresora i prema tome pregrijanje ne može dovesti do povećanja COP-a. Visoke temperature na izlazu iz kompresora utječu na stabilnost radne tvari i ulje. Slika 9 prikazuje temperaturu na izlazu iz kompresora u odnosu na temperaturu isparivanja. Propan ima puno niže temperature na izlazu iz kompresora nego R-22, time dozvoljava rad s višim temperaturama kondenzacije.



**Slika 9 Temperatura na izlazu iz kompresora u odnosu na temperaturu isparivanja, pri temperaturi kondenzacije 40 °C, 0 °C pothlađenja i 5 °C pregrijanja**

### 3. SIGURNOSNE MJERE I UPOZORENJA

Pri rukovanju s radnim tvarima jako je bitno obratiti pažnju na sigurnost, jer pri nepravilnom rukovanju može doći do otrovanja, gušenja, eksplozije, mehaničkih ozljeda. Korištenjem propana kao radnu tvar predstavlja dodatnu opasnost, u odnosu na R-22, jer je zapaljiv. Stoga se primjenjuju određene sigurnosne mjere kako bi se osigurala odgovarajuća razina sigurnosti. Pri korištenju propana, potrebno je:

- Osigurati nepropusnost sustava
- Osigurati sigurnost opreme koja se koristi ili dolazi u kontakt sa zapaljivom atmosferom
- Zaštititi radnike koji bi na radnom mjestu mogli doći u dodir sa zapaljivom atmosferom

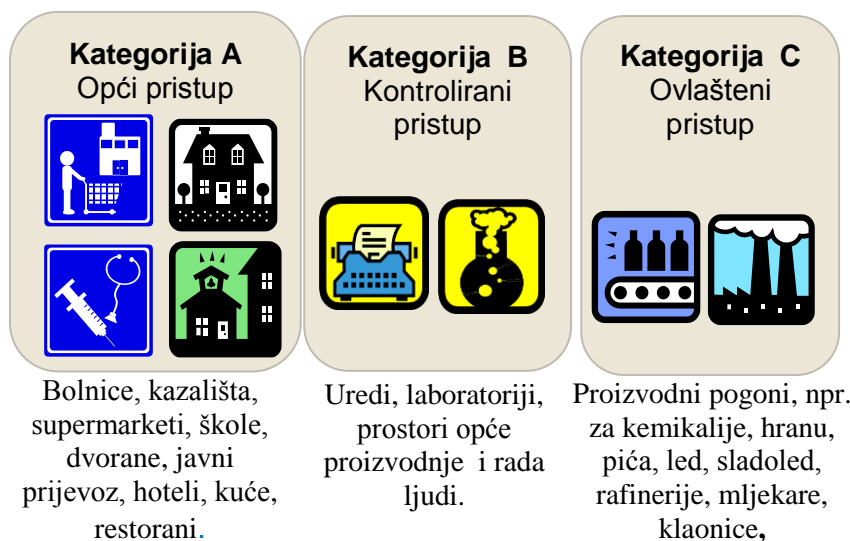
Nepropusnost i sigurnost opreme svakako je odgovornost proizvođača i instalatera opreme. Oprema mora biti konstruirana tako da emisije, a time i stvaranje zapaljive atmosfere, bude koliko god je moguće uklonjena. To se može postići nepropusnom konstrukcijom, ventilacijom i određenim zaštitnim sustavima. Na mjestima gdje je moguće stvaranje zapaljive atmosfere, mora se osigurati da zapaljivu atmosferu nije moguće zapaliti. Potrebno je ukloniti sve potencijalne izvore plamena. Važno je zaštititi radnike i osobe koje borave u objektima u kojima bi mogla nastati zapaljiva atmosfera. Stoga je važno da te osobe budu svjesne prisutnosti zapaljivih tvari te da se postave odgovarajuće sigurnosne mjere i upozorenja.

#### 3.1. Osnovna podjela prema EN378-1 i ograničenja

Norma EN378-1 nudi vrijednosti koncentracijske granice i maksimalno dozvoljenu količinu radne tvari u sustavu koja ovisi o:

- Vrsti rashladnog sustava (direktan ili indirektan)
- Smještaju sustava
- Dozvoljenom pristupu prostoru koji se hladi
- Sigurnosnoj grupi radne tvari

Prema dozvoljenom pristupu prostoru sustavi se dijele u tri kategorije s obzirom na sigurnost osoba koja bi mogla biti ugrožena pri neispravnom radu rashladnog sustava:



**Slika 10 Dozvoljeni pristup [5]**

- Kategorija A – Kategorija općeg pristupa: prostori gdje ljudi spavaju, prostori gdje se broj prisutnih ne može kontrolirati, svi imaju pristup bez upoznavanja sa sigurnosnim mjerama
- Kategorija B – Kategorija kontroliranog pristupa: prostorije u kojima se nalazi ograničen broj ljudi, neke od prisutnih je nužno upoznati s općim sigurnosnim mjerama
- Kategorija C – Kategorija s ovlaštenim pristupom: prostori koji nisu dostupni za javnost. Samo ovlaštene osobe imaju pristup i upoznate su s mjerama sigurnosti

Prema smještaju opreme sustavi se također dijele u tri kategorije:



**Slika 11 Smještaj opreme [5]**



### 3.2. Zapaljivost propana

Propan se može zapaliti ako je koncentracija propana u zraku između donje granice zapaljivosti (eng. LFL – Lower flammability limit) i gornje granice zapaljivosti (eng. UFL - Upper flammability limit, oko 10%). Granica zapaljivosti je područje koncentracija kod kojeg se smjesa zraka i zapaljivog materijala može nekim izvorom paljenja (iskrenjem, električnim lukom ili zagrijavanjem) zapaliti ili eksplodirati. Ovo područje zapaljivosti se često naziva i područje eksplozivnosti i ograničeno je donjom i gornjom granicom zapaljivosti. Donja granica zapaljivosti je najniža koncentracija zapaljivih plinova ili para koja u smjesi sa zrakom može dovesti do izgaranja i eksplozije. Gornja granica zapaljivosti je najviša koncentracija zapaljivih plinova ili para koja u smjesi sa zrakom može dovesti do izgaranja i eksplozije. Iznad te granice plinovi se neće zapaliti u kontaktu sa sredstvom za paljenje. U Tablici 3 su prikazane granice zapaljivosti i temperatura zapaljenja propana.

Radna tvar	Energija zapaljenja [mJ]	Donja granica zapaljivosti -LFL		Gornja granica zapaljivosti - UFL		Temperatura zapaljenja [°C]
		[% vol.]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[% vol.]	[kg/m <sup>3</sup> ]	
Propan (R290)	0,25	2,10	0,038	9,5	0,171	470

**Tablica 3 Svojstva zapaljivosti propana [8]**

Sigurnosna klasifikacija propana je A3 i prikazana je u Tablici 4.

KLASIFIKACIJA			Toksičnost	
			Klasa A	Klasa B
			Niska toksičnost	Visoka toksičnost
Zapaljivost	Klasa 1	Nema širenja plamena	A1	B1
	Klasa 2	Zapaljivo	A2	B2
	Klasa 2L	Slabo zapaljivo	A2L	B2L
	Klasa 3	Jako zapaljivo	A3	B3

**Tablica 4 Sigurnosna klasifikacija radnih tvari [5],[7]**

Slovo A predstavlja klasu toksičnosti i prikazana je u Tablici 5. Klasifikacija prema toksičnosti temelji se na tome je li utvrđena toksičnost u koncentracijama manjim od 400ppm po volumenu na temelju podataka koji se koriste za određivanje granične vrijednosti.

Klasa	Opis
A	Tvari kojima nije utvrđena toksičnost pri koncentracijama manjim od 400ppm.
B	Tvari kojima je primijećena toksičnost pri koncentracijama manjim od 400ppm.

**Tablica 5 Klase toksičnosti [5],[7]**

Broj 3 predstavlja klasu zapaljivosti i prikazan je u Tablici 6. Klasifikacija prema zapaljivosti temelji se na tome je li moguće zapaliti tvar u standardiziranim testovima pri vrijednostima donje granice zapaljivosti (eng. LFL - lower flammability limit) i topline izgaranja.

Klasa	Opis
1	Tvari ne pokazuju širenje plamena pri testiranju na zraku temperature 60°C i standardnom atmosferskom tlaku (101,3kPa)
2	Tvari pokazuju širenje plamena pri testiranju na zraku temperature 60°C i standardnom atmosferskom tlaku (101,3kPa)
	Donja granica zapaljivosti (LFL) > 3,5% po volumenu
	Toplina izgaranja $\geq 19\,000$ J/kg
2L*	Tvari pokazuju širenje plamena pri testiranju na zraku temperature 60°C i standardnom atmosferskom tlaku (101,3kPa) te imaju maksimalnu brzinu gorenja $\leq 10$ cm/s pri testiranju na 23°C i standardnom atmosferskom tlaku (101,3kPa)
	Donja granica zapaljivosti (LFL) > 3,5% po volumenu
	Toplina izgaranja < 19 000 J/kg
3	Tvari pokazuju širenje plamena pri testiranju na zraku temperature 60°C i standardnom atmosferskom tlaku (101,3kPa)
	Donja granica zapaljivosti (LFL) $\leq 3,5\%$ po volumenu
	Toplina izgaranja $\geq 19\,000$ J/kg

**Tablica 6 Klase zapaljivosti [5],[7]**

### 3.3. Dozvoljena količina punjenja sustava prema EN378-1

Propan pripada sigurnosnoj grupi A3 (niska toksičnost i jako zapaljivo). Sljedeća tablica (Tablica 7) prikazuje dozvoljenu količinu punjenja sustava prema normi EN 387-1.

Sigurnosna grupa A3		
Smještaj rashladnog sustava	Opći pristup - Kategorija A	
	Direktni sustav	Indirektni sustav
I.	1 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu,  Svi ostali rashladni sustavi : Samo zatvoreni sustavi s najvećom količinom punjenja = PL x volumen prostorije te ne premašuje 1,5 kg	2 smatra se direktnim sustavom, vidi pod br. 1

II.	3 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Samo sustavi zatvoreni sustavi s najvećom količinom punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1,5 kg	4 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1,5 kg
III.	5 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Samo sustavi zatvoreni sustavi s najvećom količinom punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 5 kg za smještaj iznad razine zemlje	6 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 5 kg za smještaj iznad razine zemlje
	Kontrolirani pristup – Kategorija B	
	Direktni sustav	Indirektni sustav
I.	7. Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 2,5 kg za smještaj iznad razine zemlje	8 smatra se direktnim sustavom, vidi pod br. 7
II.	9 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 2,5kg za smještaj iznad razine zemlje	10 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 2,5 kg za smještaj iznad razine zemlje
III.	11 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 10 kg za smještaj iznad razine zemlje	12 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Najveća količina punjenja = $PL \times \text{volumen}$ prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 10 kg za smještaj iznad razine zemlje

	Ovlašteni pristup – Kategorija C	
	Direktni sustav	Indirektni sustav
I.	13 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Najveća količina punjenja = PL x volumen prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 10 kg za smještaj iznad razine zemlje	14 smatra se direktnim sustavom, vidi pod br. 13
II.	15 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Svi ostali rashladni sustavi : Najveća količina punjenja = PL x volumen prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 25kg za smještaj iznad razine zemlje	16 Klimatizacijski sustavi i dizalice topline za komfornu primjenu, Najveća količina punjenja = PL x volumen prostorije te ne premašuje 1 kg za smještaj ispod razine zemlje ili 25 kg za smještaj iznad razine zemlje
III.	17 . nema ograničenja	18 nema ograničenja

**Tablica 7 Dozvoljena količina radne tvari prema EN 387-1 – Sigurnosna grupa A3 [5],[7]**

### 3.4. Koncentracijska granica propana

Dodatna mjera sigurnosti za primjenu radnih tvari je koncentracijska granica (eng. PL – practical limit) koja predstavlja najveću razinu koncentracije u prostoru boravka koja neće rezultirati štetnim posljedicama. Budući da za propan kao radnu tvar 20% donje granice zapaljivosti (LFL) predstavlja najnižu koncentraciju, ona se koristi za određivanje koncentracijske granice PL. Koncentracijska granica se uobičajeno izražava kao masa po jedinici volumena i za propan približno iznosi  $0,008\text{kg/m}^3$  ili  $8\text{g/m}^3$  [7].

$PL = 20\%$  donje granice zapaljivosti (eng. LFL - Lower Flammability Limit)

Sustavi s punjenjem manjim od 150 g mogu biti ugrađeni u prostorijama bilo kojeg volumena [1]. Sustavi s punjenjem većim od 150 g volumen prostorije mora biti takav da koncentracija propana u prostoriji bude manja od  $8\text{ g/m}^3$  [1].

### 3.5. Maksimalna dozvoljena količina propana u sustavu

Maksimalno dozvoljena količina radne tvari u sustavu za komforno grijanje/hlađenje temelji se na donjoj granici zapaljivosti (LFL) radne tvari, površini poda i visini unutrašnje jedinice:

$$m_{max} = 2,5 \cdot LFL^{1,25} \cdot h \cdot A^{1/2} \text{ [kg]}$$

Gdje je,

$m_{max}$  – najveća količina punjenja [kg]

$LFL$  – donja granica zapaljivosti [kg/m<sup>3</sup>]

$h$  – visina jedinice [m] (0,6 zidne, 1 prozor, 1,8 zid, 2,2 strop)

$A$  – površina poda [m<sup>2</sup>]

Maksimalno punjenje sustava za nekomforno grijanje/hlađenje temelji se na dva ograničenja, a primjenjuje se onaj čija je vrijednost manja:

- Koncentracijska granica (eng. PL -Practical limit) temeljena na veličini prostorije
- Maksimalno dozvoljena količina radne tvari u sustavu temeljena na smještaju sustava i boravku u prostoru

Određivanje maksimalno dozvoljenog punjenja sustava izraženo preko koncentracijske granice, volumen prostorije se množi s vrijednosti koncentracijske granice PL:

$$m_{max} = PL \cdot V_{prostorije} \text{ [kg]}$$

### 3.6. Postupci konstruiranja sustava koji koristi zapaljive radne tvari

Propuštanje zapaljive radne tvari može stvoriti potencijalno zapaljivu zonu oko sustava. Izvori plamena unutar potencijalno zapaljive zone predstavljaju opasnost u slučaju propuštanja. Neophodan postupak pri konstruiranju sustava je određivanje granica potencijalno zapaljive zone. Također je potrebno osigurati da unutar potencijalno zapaljive zone nema izvora plamena. Kao primjer u Tablici 8 dan je postupak osiguravanja HC sustava bez obzira na količinu punjenja.

Korak 1		Smanjiti količinu punjenja radne tvari. Smanjiti broj mjesta potencijalnog propuštanja.
Korak 2		Provesti testiranje zapaljive zone (klasifikacija područja) kako bi se utvrdio opseg potencijalno zapaljive zona u slučaju propuštanja.
Korak 3		Identifikacija izvora plamena unutar potencijalno zapaljive zone.
Korak 4	Opcija 1	Maknuti izvor plamena izvan potencijalno zapaljive zone.
	Opcija 2	Zamijeniti izvor plamena s prikladnim uređajem.
	Opcija 3	Povećati dotok zraka ili održavati neprekidan dotok zraka kako bi se smanjila potencijalna zapaljiva zona.
	Opcija 4	Smjestiti izvor plamena u odgovarajuće kućište (najčešće je to preveliki trošak za male sustave i teško ga je postići)
Korak 5		Obilježiti sustav s ISO naljepnicom za zapaljivi plin, informacijama o sigurnim radnim postupcima i najmanjoj veličini prostorije

**Tablica 8 Postupak osiguravanja HC sustava [3],[5]**

- Sustavi trebaju biti izvedeni tako da se osiguraju sigurni i čvrsti spojevi
  - Čvrstoća testirana na ispitnom tlaku 1,43 x PS;
  - Treba provesti tlačno ispitivanje čvrstoće i nepropusnosti sustava, postignuti vakuum te provjeru uspješnosti treba zabilježiti.
  - Sustav bi prije punjenja trebao održavati vakuum od 0,5 mbar najmanje 15 minuta. Područje punjenja ne smije biti ispod razine tla.
  - Potrebno je osigurati protok dovoljne količine zraka na mjestima gdje se zapaljive tvari spremaju i koriste. Odgovarajuća ventilacija znači da će para nastala curenjem ili ispuštanjem brzo biti raspršena.
  - Potrebno je ukloniti sve izvore plamena od opreme i potencijalno zapaljive zone. Izvori plamena mogu biti različiti kao što su: iskre električne opreme, alat za zavarivanje ili rezanje, vruće površine, otvoren plamen opreme za grijanje, opušak.
- Izvori plamena povezani s rashladnim sustavima najčešće uključuju:
- „On/off“ sklopku
  - Osigurače
  - Sklopke za tlak
  - Prekoračenje temperature
  - Motor ventilatora
  - Termostat

- Važno je da uređaj za detekciju zapaljivog plina točno mjeri korištenu radnu tvar i da nije ometan drugim česticama iz zraka. Osjetnici trebaju detektirati propuštanje zapaljive radne tvari i u tom slučaju sustav prebacuje ventilaciju na visoku razinu, uključuje alarm i isključuje rashladni sustav iz rada.
- Najmanja količina zapaljive radne tvari trebala bi biti unutar područja punjenja. Svi ostali spremnici trebali bi biti smješteni vani u sigurnom prostoru.
- Nadređeni i tehničari koji rade sa zapaljivom radnom tvari i servisiraju sustava moraju biti dobro obučeni i opremljeni o sigurnosnom rukovanju sa zapaljivim radnim tvarima.
- Pristup sustavu koji koristi zapaljivu radnu tvar treba biti ograničen samo za osobe koje su prošle obuku za sigurnosno rukovanje.
- Aparati za gašenje požara trebaju biti postavljeni u području punjenja.
- Važno je osigurati znakove upozorenja, oznake i detaljne informacije svim osobama koje pristupaju sustavu, kao što su:
  - Upozorenje na opasne tvari unutar sustava, spremnika, radnog prostora
  - Zahtijevanje određenih aktivnosti koje bi radnici i ostalo osoblje trebalo činiti
  - Napomenuti radnicima i ostalom osoblju što se ne smije raditi
  - Informiranje radnika o ispravnim postupcima pri radu s opremom



Slika 12 Znakovi zabrane i opasnosti [5],[10]

Sustavi bi trebali biti jasno označeni s ISO naljepnicom kako bi se uočila vrsta radne tvari i da je zapaljiva.



Slika 13 ISO naljepnica [5]

**Refrigerant R290 (Care 40, Propane)**

This unit must not be located in a room or area with a volume less than XXX m<sup>3</sup>.

**Note:** Only engineers who have been trained in the safe handling and use of hydrocarbon (HC) refrigerants should work on this system.

- Work on this system in a well ventilated area or outside.
- Use a local leak detector to indicate if there is hydrocarbon in the air around the system before and during work on the system (place it at low level - HCs are heavier than air).
- Ensure there are no sources of ignition (flames or sparking electrical components) within 3 m (10 feet) of your work area.
- If replacing components, use like for like replacements.
- Take great care when brazing to ensure all HC has been removed from the system.

Use refrigerant grade propane (R290 or CARE 40).

Slika 14 Primjer naljepnice za sustave sa zapaljivom radnom tvari [5]



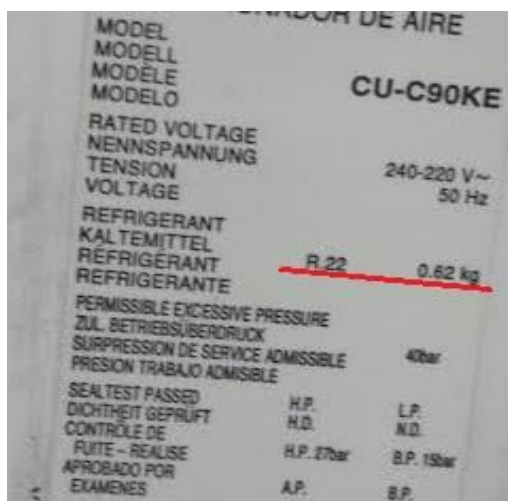
## 4. PROCES PROVEDBE KONVERZIJE SUSTAVA

### 4.1. Primjer konverzije split rashladnog uređaja s R-22 na R-290

Rashladni sustavi koji ispravno rade ili sustavi koji imaju većih problema poput korozije izmjenjivača u pravilu ne bi trebali biti podvrgnuti postupku konverzije sustava na bilo koju drugu radnu tvar. Sustav može biti podvrgnut postupku konverzije kada postoje manji problemi s opremom ili trenutnom radnom tvari. U nastavku je prikazan postupak konverzije sustava po koracima.

- 1. Korak

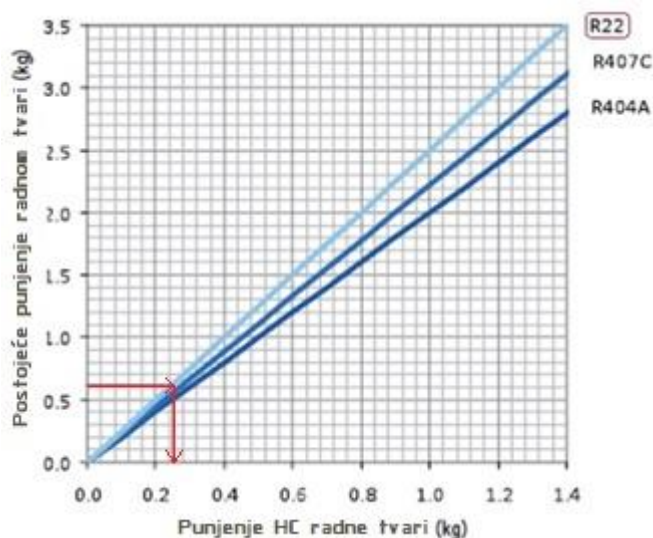
Potrebno je utvrditi kolika je trenutna količina punjenja sustava. Količina punjenja sustava najčešće je naznačena na pločici s podacima. Ako nema dostupnih podataka na vanjskoj jedinici, potrebno je pogledati na unutrašnjoj jedinici. Količina punjenja može se procijeniti i na temelju prikupljene količine radne tvari iz sustava, uz pretpostavku da nije bilo propuštanja. Na Slici 15 prikazana je pločica s podacima gdje se vidi da je sustav trenutno napunjen sa 0,62 kg R-22.



Slika 15 Pločica s podacima

- 2. Korak

Procjena ekvivalentne količine punjenja radne tvari ( $M_{HC}$ ). Prema dijagramu, koji je prikazan na slici (Slika 16) i trenutne količine punjenja sustava s R-22 očitava se ekvivalentna količina punjenja radne tvari R-290. Iz dijagrama vidimo da je za dosadašnju količinu 0,62 kg R-22 potrebno 0,24 kg R-290.



**Slika 16 Procjena ekvivalentne količine punjenja radne tvari R-290 [3]**

- 3. Korak

Određivanje kategorije pristupa i smještaja opreme određujemo kakav je pristup vanjskoj i unutarnjoj jedinici, da li se vanjska jedinica nalazi u dobrom ventiliranom prostoru ili ne, je li sustav ispod ili iznad razine zemlje, da li su dijelovi koji sadrže radnu tvar u ili izvan zone boravka.



**Slika 17 Vanjska jedinica**



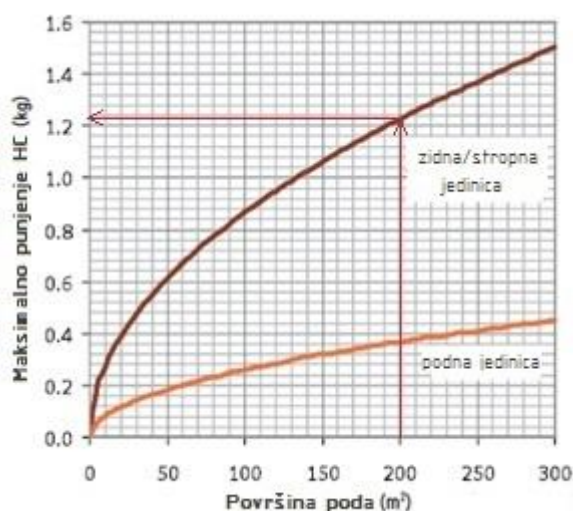
**Slika 18 Unutarnja jedinica**

- Određeno je da je vanjska jedinica smještena u dobro ventiliranom prostoru, a unutarnja jedinica smještena je u prostor za komfornu primjenu. Sustav pripada kategoriji A: opći pristup, iznad razine zemlje i smještaj opreme kategorije II.

- 4. Korak

Provjera dozvoljene količine punjenja sustava. Najviša dozvoljena količina radne tvari u sustava za kategoriju A – opći pristup iznosi 1,5 kg. Količina punjenja sustava je ispod najviše dozvoljene ( $0,24\text{kg} < 1,5\text{kg}$ ).

Potrebno je provjeriti je li količina radne tvari dopuštena za danu površinu prostorije. Izračunatu površinu prostorije gdje je smještena unutrašnja jedinica i gdje borave ljudi, potrebno je usporediti s količinom punjenja propana (Slika 19 ).



**Slika 19 Najviša dopuštena količina radne tvari za postojeću veličinu prostora [3]**

Veličina prostorije iznosi  $10\text{m} \times 20\text{m} = 200\text{m}^2$ . Za površinu poda  $200\text{m}^2$  i zidnu jedinicu iz dijagrama vidimo da je maksimalno količina punjenje propana 1,21 kg. Stoga je punjenje sustava ispod najvišeg dopuštenog ( $0,24\text{kg} < 1,21\text{kg}$ ).

- 5. Korak

Potrebno je osigurati sav potreban alat, opremu, instrumente i rezervne dijelove:

- Uobičajeni ručni alat prikladan za korištenje na komponentama rashladnog kruga i elektronici
- Uređaj za prikupljanje radne tvari namijenjen prvenstveno za HCFC R-22 no prikladan i za korištenje sa zapaljivim radnim tvarima
- Spremnik za prikupljanje radne tvari za R-22
- Spremnik za prikupljanje maziva
- Crijevo za prikupljanje radne tvari
- Tablice tlaka-temperature za HC radnu tvar
- Vakuum pumpa s priključkom za crijevo za prikupljanje radne tvari

- Vakuummetar (200 mikrona)
- Ručni detektor HC plina
- Spremnik dušika
- Alat za spajanje cijevi („Lok-ring“ spojnica)
- Naljepnice s upozorenjem o zapaljivom plinu (žuti trokut)
- Znakovi upozorenja o zapaljivoj ranoj tvari
- Znakovi upozorenja o radnom prostoru
- Zaštitne rukavice i naočale
- Aparat za gašenje požara

- 6. Korak

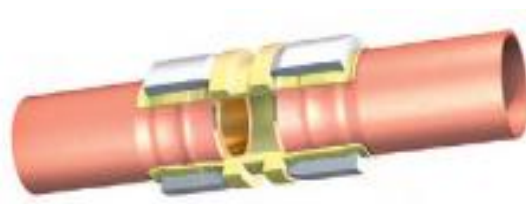
Ukloniti mehaničke spojeve iz prostora boravka. Mehanički spojevi su česta mjesta propuštanja radne tvari iz sustava i predstavljaju opasnost stvaranja zapaljive zone. Uklanjanje mehaničkih spojeva možemo izvesti spajanjem cijevi lemljenjem, ako sustav još nije punjen zapaljivom radnom tvari, u suprotnom spojeve uklanjamo „Lok-ring“ spojnicom.



**Slika 20 Mehanički spoj u zoni boravka [4]**



**Slika 21 Uklanjanje mehaničkih spojeva cijevi lemljenjem [4]**



**Slika 22 „Lok-ring“ spojnica [4]**



**Slika 23 Spajanje cijev s „Lok-ring“ spojnica [4]**

- 7. Korak

Resetirati uređaj za tlak.

- 8. Korak

Ukloniti sve potencijalne izvore plamena. Žičani spojevi moraju biti zategnuti i žice moraju biti u dobrom stanju. Svi električni spojevi trebaju biti kvalitetno pregledani. Labavi spojevi će prije ili kasnije stvoriti iskre i oštećenja komponenti. Prljavština i vlaga mogu stvoriti kratak spoj.



**Slika 24 Provjera izvora plamena [4]**

Izolacijska kutija na kompresoru mora biti dobro pričvršćena i žičani spojevi moraju biti u dobrom stanju, dobro pričvršćeni vijcima i izolirani kako bi izbjegli iskrenje.



**Slika 25 Žičani spojevi i izolacija [4]**

Električni prekidači bi trebali biti smješteni unutar hermetički zatvorenog kućišta.



**Slika 26 Izolacijska kutija [4]**

- 9. Korak

Postaviti detekcijski, ventilacijski i alarmni sustav. Osjetnici trebaju detektirati propuštanje zapaljive radne tvari i u tom slučaju sustav prebacuje ventilaciju na visoku razinu, uključuje alarm i isključuje rashladni sustav iz rada.

- 10. Korak

Provedba tlačne probe i testa čvrstoće. Nakon montaže svih komponenti rashladnog sustava potrebno je provjeriti nepropusnost sustava i napraviti tlačni test. To se provodi istovremeno punjenjem sustava inertnim plinom dušikom do ispitnog tlaka koji je jednak 1,43 puta maksimalni radni tlak u sustavu, te se prati promjena tlaka plina u sustavu.

$$\text{Ispitni tlak} = 1,43 \times p_{\max} = 1,43 \times 16,04 = 23 \text{ bara}$$

Tlačna proba se izvodi u trajanju od 12 ili 24 sata. Postupak provedbe tlačne probe:

- Spremnik s dušikom spojen je s priključnim crijevom na vanjsku jedinicu.
- Dušik prelazi u sustav laganim podešavanjem i otvaranjem regulatora tlaka dok se u sustavu ne dostigne tlak od 23 bara (2,3 MPa).
- Provjeriti svaki spoj i komponente koristeći sapunastu vodu ili drugi sličan fluid. U slučaju propuštanja na spojevima će se pojaviti mjehurići.
- Ako se uoči propuštanje, potrebno je slijediti odgovarajuće postupke za popravak.
- Ako sustav ne propušta, ispustiti dušik iz sustava polako i pažljivo u okolinu.



Slika 27 Tlačna proba [4]



- 11. Korak

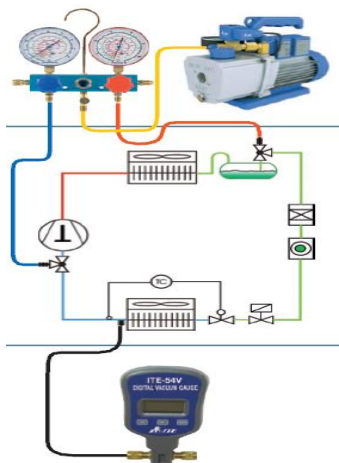
Označiti trenutno zapaljive zone. Kada se radi o sustavima koje koriste zapaljive radne tvari potrebno je označiti određena mjesta kao "privremeno zapaljive zone ". To su područja gdje je tijekom prikupljanja ili punjenja sustava moguća emisija radne tvari.



Slika 28 Privremeno zapaljiva zona [3]

- 12. Korak

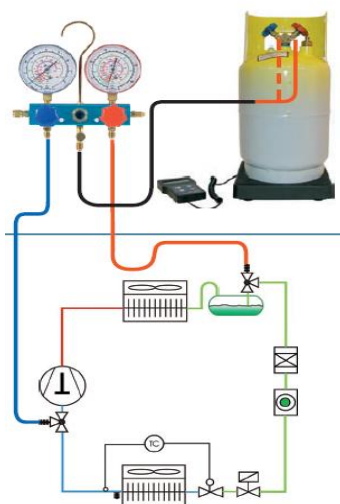
Nakon što je sustav zabrtvljen, provjereno propuštanje i provedena tlačna proba, potrebno je sustav isprazniti kako bi se uklonio zrak, vlaga i neželjena zaostala radna tvar. Prilikom spajanja crijeva između sustava, manometarskog razdjelnika i dvostupanjske vakuum pumpe, potrebno je osigurati da su spojevi čvrsti i ne postoje potencijalni izvori zapaljenja u blizini. Vakuumiranjem je potrebno smanjiti tlak u sustavu ispod parcijalnog tlaka vodene pare za pripadnu temperaturu, a zatim ostavljen da odstoji najmanje 15 minuta ( bez promjene tlaka) kako bi se osiguralo da je sva radna tvar uklonjena iz ulja te da je sva preostala vlaga isparila. Ako tlak i dalje raste, to bi mogla biti posljedica isparavanja vlage. Ako se navedeno događa i nakon dva ili više postupka vakuumiranja, tada to upućuje na prisutnost propuštanja. Sustav bi trebao biti ispražnjen na obje strane, visokotlačnoj i niskotlačnoj strani.



Slika 29 Vakumiranje sustava [5],[12]

- 13. Korak

Nakon uspješne izvršene tlačne i vakuumske probe pristupa se punjenju sustava. Proces punjenja klimatizacijskog sustava s HC radnom tvari sličan je onima koji koriste HCFC radne tvari (R-22). Budući da je R-290 čista radna tvar, punjenje se može provoditi u plinovitom ili tekućem stanju. Za male količine radne tvari (kao u ovom primjeru 0.24 kg) punjenje sustava se može izvesti tako da se uzima para iz spremnika radne tvari i puni na usisni cjevovod kompresora. Količinu punjenja treba pratiti upotrebom točne i osjetljive vage. Zbog sigurnosnih razloga treba koristiti najmanje veličine spremnika radne tvari.



Slika 30 Punjenje sustava [5],[12]



Slika 31 Oprema za vakumiranje i punjenje sustava [5],[12]



- 14. Korak

Nakon punjenja sustava važno još jednom provjeriti da li je sustav nepropustan. Potrebno je provjeriti sve zglobove, priključke i komponente sustava. Provjera propuštanja se može izvesti na više načina: pomoću spreja koji tvori mjehuriće, elektronskog detektora plina, fluorescentnih aditiva ili ultrazvučnih detektora propuštanja.



**Slika 32 Provjera propuštanja mjehurićima [4]**



**Slika 33 Elektronični detektor plina [4]**

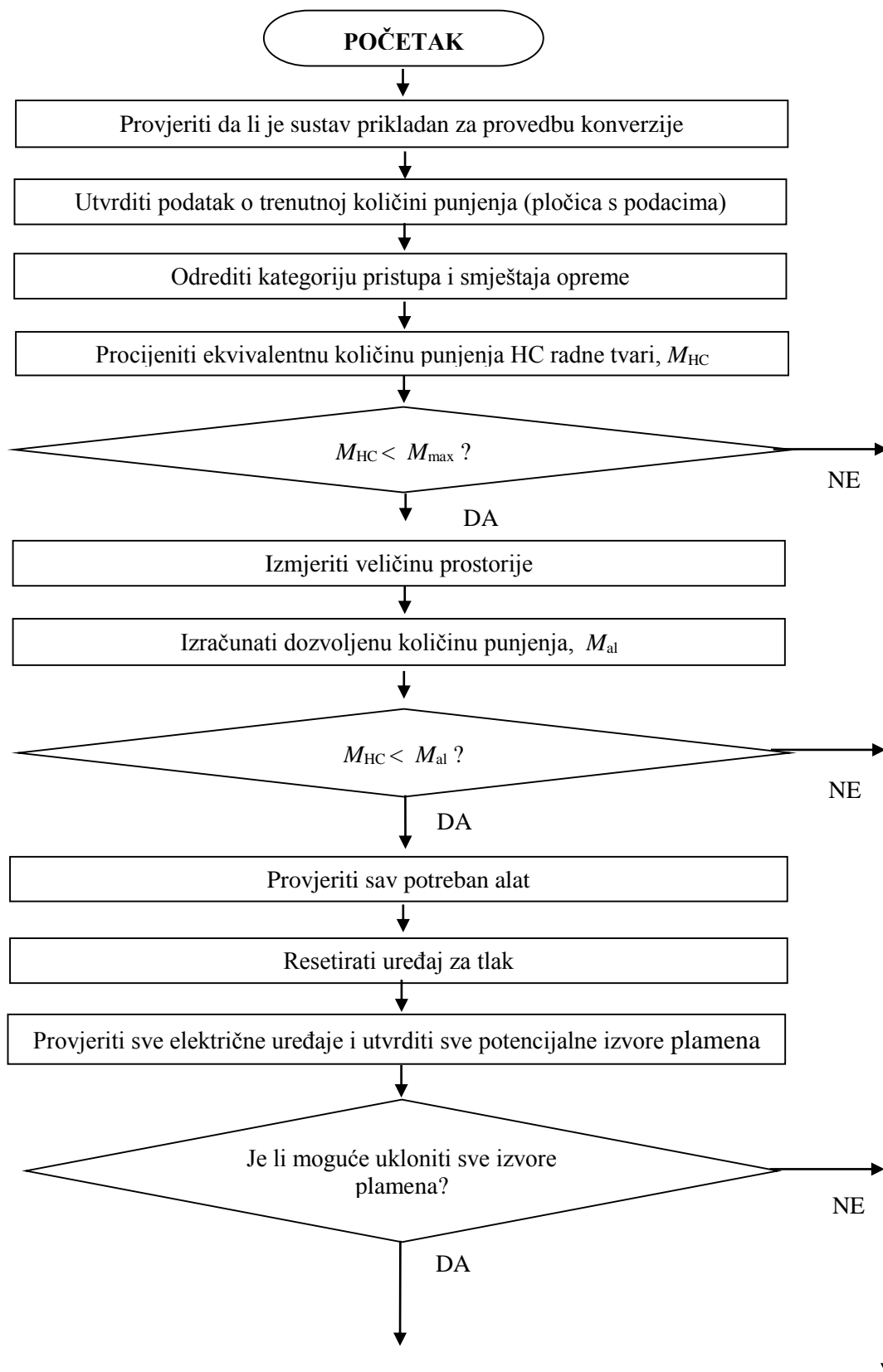
- 15. Korak

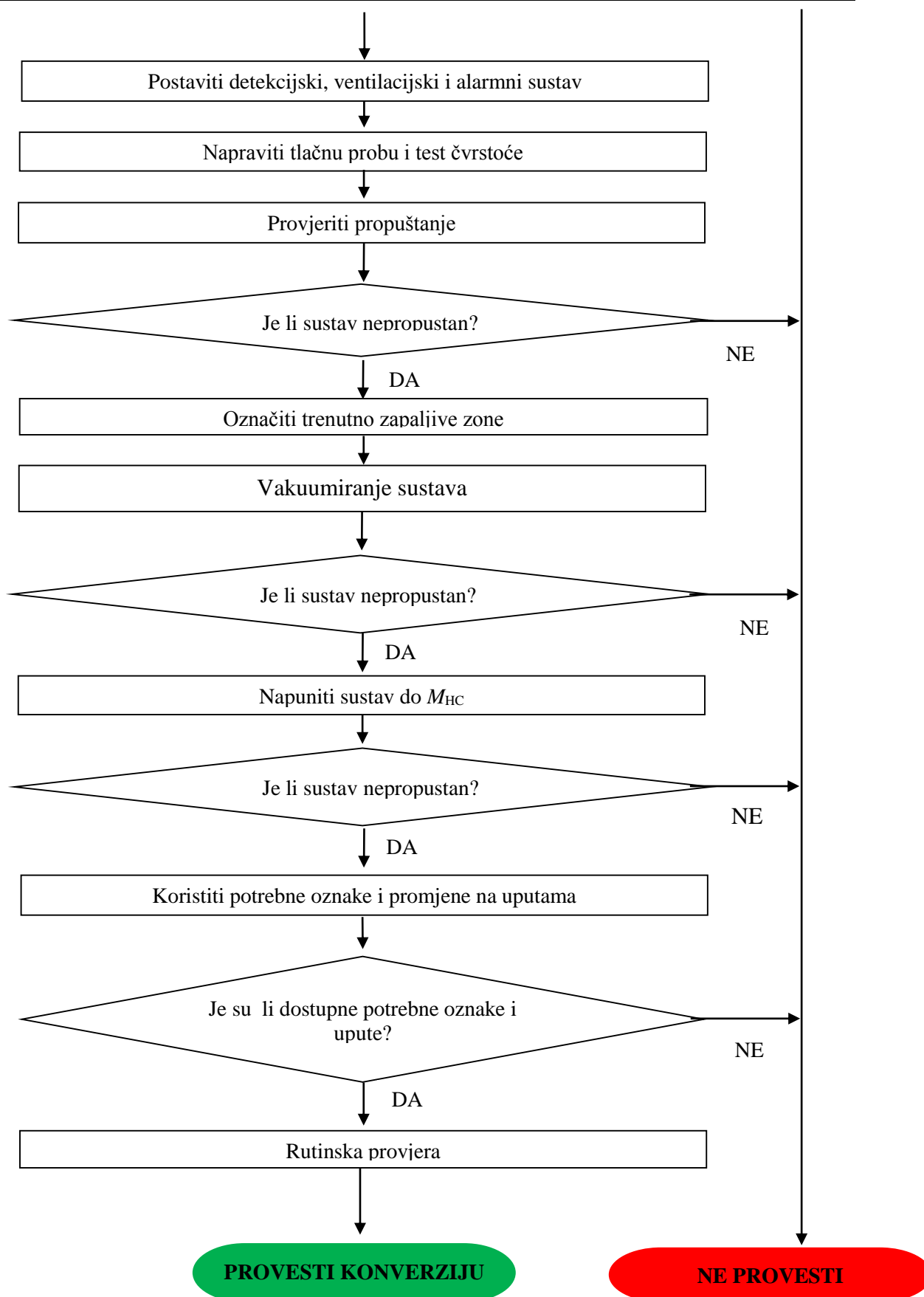
Na kraju je još potrebno osigurati i koristiti odgovarajuću dokumentaciju, znakove i upozorenja kao što je prikazano na slici (Slika 34).



**Slika 34 Označavanje vanjske jedinice [4]**

## 4.2. Dijagram provođenja konverzije sustava





Slika 35 Dijagram toka provedbe konverzije sustava [5],[3]

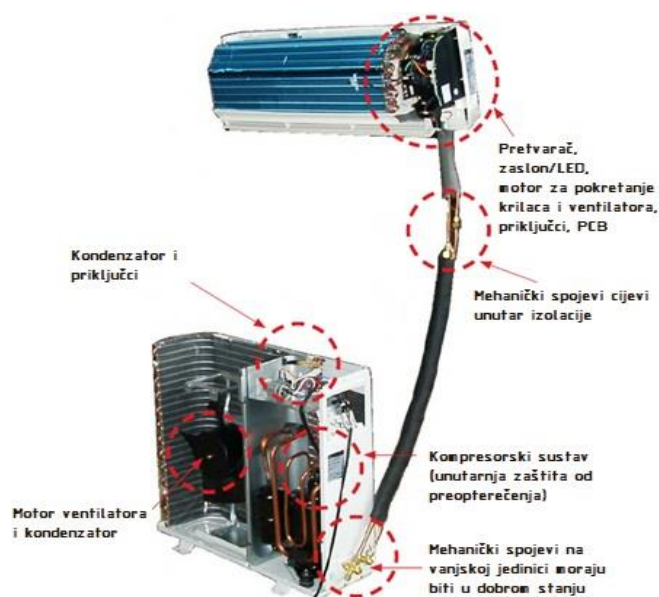
#### 4.3. Osnovne upute i promjene na konstrukciji sustava

Promjene konstrukcije na rashladnim i klimatizacijskim sustavima su potrebne kako bi se osiguralo da su ispunjeni sigurnosni zahtjevi. Bitno je nadograditi odgovarajuće sigurnosne značajke na temelju vrste sustava, lokacije, boravku ljudi i količine punjenja HC radne tvari. Nepravilna konstrukcija može dovesti do ozbiljnih rizika od zapaljenja. Najčešće se provodi:

- Uklanjanje mehaničkih spojeva iz prostora boravka i smanjenje mogućnosti propuštanja
- Uklanjanje svih mogućih izvora plamena
- Postavljanje detekcijskog/ventilacijskog/alarmnog sustava
- Primjena odgovarajućih oznaka i izmjena u uputama

Poseban naglasak treba staviti na određivanje potencijalnih izvora plamena. Potrebno je provesti sljedeće procjene:

- Pregledati sustav i pripadajuću opremu uz naglasak na električne komponente
- Odrediti koje komponente djeluju kao potencijalni izvori plamena
- Odrediti načine rukovanja svakog potencijalnog izvora plamena, primjerice:
  - o Zamjena brtvljenim komponentama i smještaj u brtvljene prostore
  - o Korištenje poluvodičkih komponenata
  - o Premještanje izvan jedinice, udaljeno od propuštanja radne tvari
- Osigurati električne priključke i žičane spojeve, osigurati dovoljno izolacije kako bi se izbjegao kratki spoj i na odgovarajući način provesti izmjene



**Slika 36 Primjer provjere potencijalnih izvora plamena, konstrukcijskih izmjena, područja mogućih intervencija [3]**

## 5. TERMODINAMIČKI PRORAČUN PROCESA

### 5.1. Određivanje točaka procesa

$\Phi_o = 2,5 \text{ kW}$  - rashladni učin isparivača

$T_i = 10 \text{ °C}$  - temperatura isparivanja

$T_p = 27 \text{ °C}$  - temperatura prostorije

$T_{ok} = 35 \text{ °C}$  - temperatura okoliša

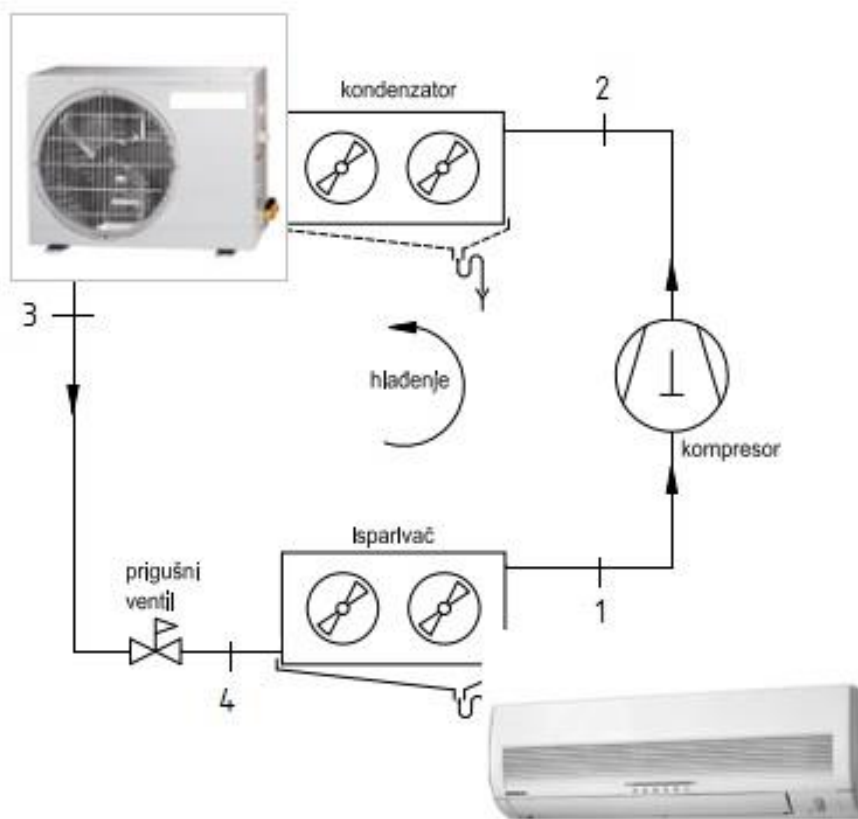
$\eta_k = 0,75$  - izentropski stupanj djelovanja kompresora

- odabrana temperatura kondenzacije radne tvari:

$T_k = 47 \text{ °C}$

- odabrane temperature pregrijanja i pothlađenja:

$\Delta T_1 = 6 \text{ °C}$  i  $\Delta T_3 = 3 \text{ °C}$



Slika 37 Shema rashladnog sustava [2]

Potrebne jednadžbe:

Rashladni učin isparivača:

$$\Phi_o = q_m \cdot (h_1 - h_4) \text{ (kW)}$$

Snaga kompresora:

$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_1) \text{ (kW)}$$

Toplinski učin kondenzatora:

$$\Phi_k = \Phi_i + P_k \text{ (kW)}$$

Maseni protok radne tvari:

$$q_m = \frac{\Phi_o}{h_1 - h_4} \text{ (kg/s)}$$

Izentropski stupanj djelovanja kompresora:

$$\frac{h_{2s} - h_2}{h_2 - h_1} = \eta_k$$

Specifična toplina isparivanja:

$$r = h_1 - h_4 \text{ (kJ/kg)}$$

Kompresijski omjer:

$$p_k / p_i$$

Volumetrički rashladni učin:

$$q_{ov} = \rho_1 \cdot r \text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

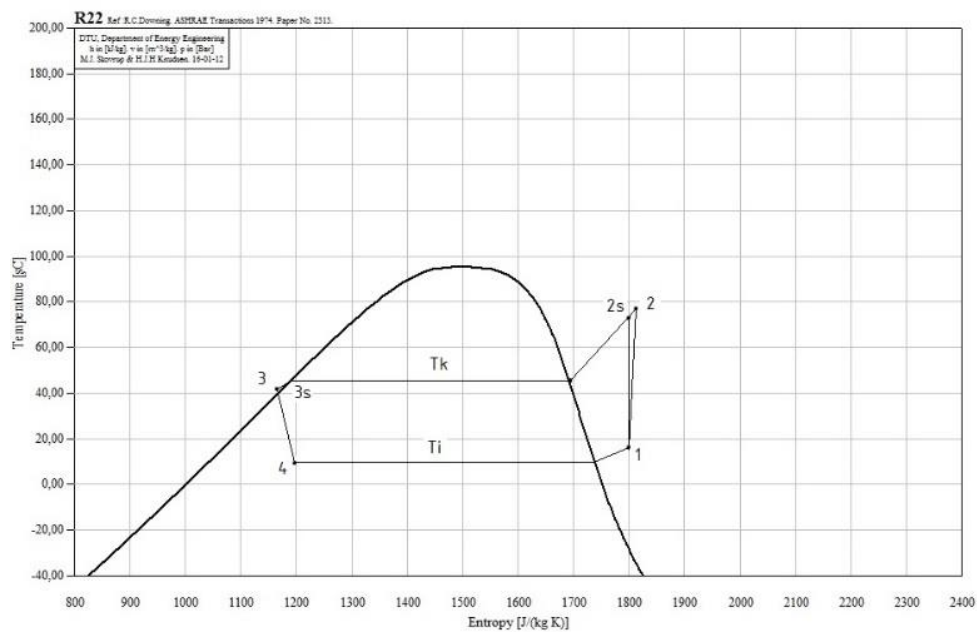
Volumetrička potrošnja energije

$$Q_{ov} = \rho_1 \cdot (h_2 - h_1) \text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

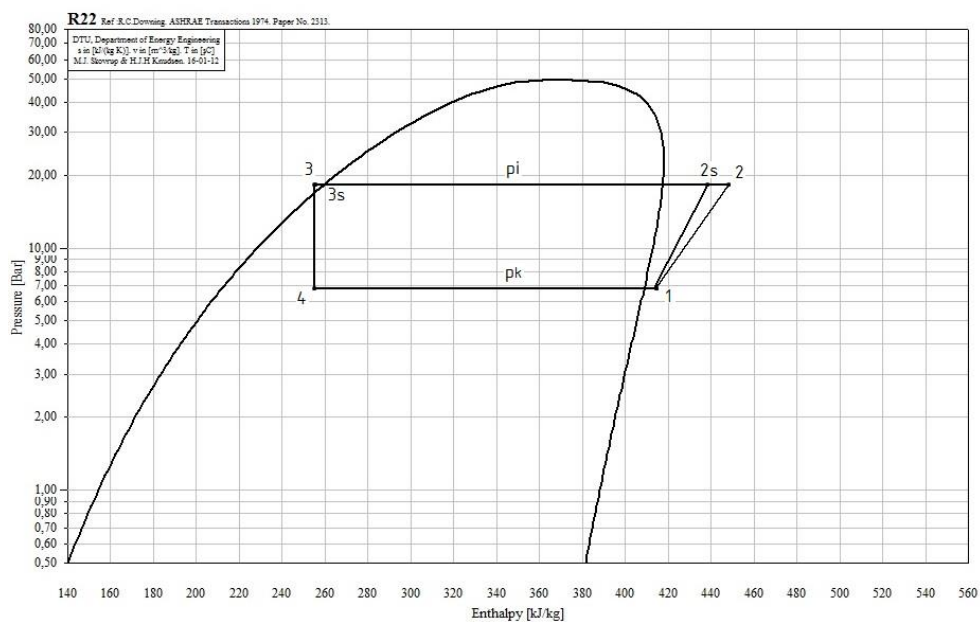
Faktor hlađenja:

$$COP = \frac{\Phi_o}{P_k}$$

### 5.1.1. Proračun sustava s R-22



Slika 38 T – s dijagram za R-22 [13]



Slika 39 log p – h dijagram za R-22 [13]

Točka	Temp.	Tlak	Gustoća	Entalpija	Entropija
	(°C)	(bar)	(kg/m³)	(kJ/kg)	(kJ/kgK)
1	16	6,8	27,8	413,6	1,75
2s	73,2	18,12	75,2	439,7	1,75
2	79,3	18,12	64,1	448,4	1,8
3s	47	18,12	1097	259	1,19
3	44	18,12	1111	254,9	1,18
4	10	6,8	121,7	254,9	1,19

**Tablica 9 Svojstva radne tvari R-22 za odabrane temperature [14]**

$$q_m = \frac{\Phi_o}{h_1 - h_4} = \frac{2,5}{413,6 - 254,9} = 0,016 \text{ (kg/s)}$$

$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_1) = 0,016 \cdot (448,4 - 413,6) = 0,557 \text{ (kW)}$$

$$\Phi_k = \Phi_i + P_k = 2,5 + 0,557 = 3,057 \text{ (kW)}$$

$$\frac{h_{2s} - h_2}{h_2 - h_1} = 0,75$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_2}{0,75} = 448,4 \text{ (kJ/kg)}$$

$$r = h_1 - h_4 = 413,6 - 254,9 = 158,7 \text{ (kJ/kg)}$$

$$\frac{p_k}{p_i} = \frac{18,12}{6,8} = 2,66$$

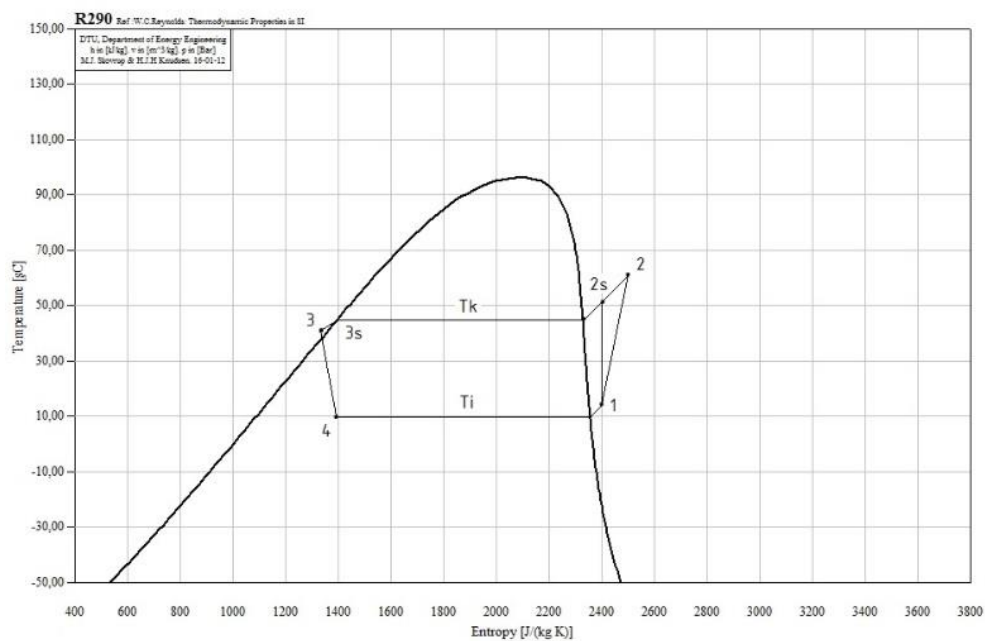
$$q_{ov} = p_1 \cdot r = 27,8 \cdot 158,7 = 4411,86 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

$$Q_{ov} = p_1 \cdot (h_{2s} - h_1) = 27,8 \cdot (439,7 - 413,6) = 725,6 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

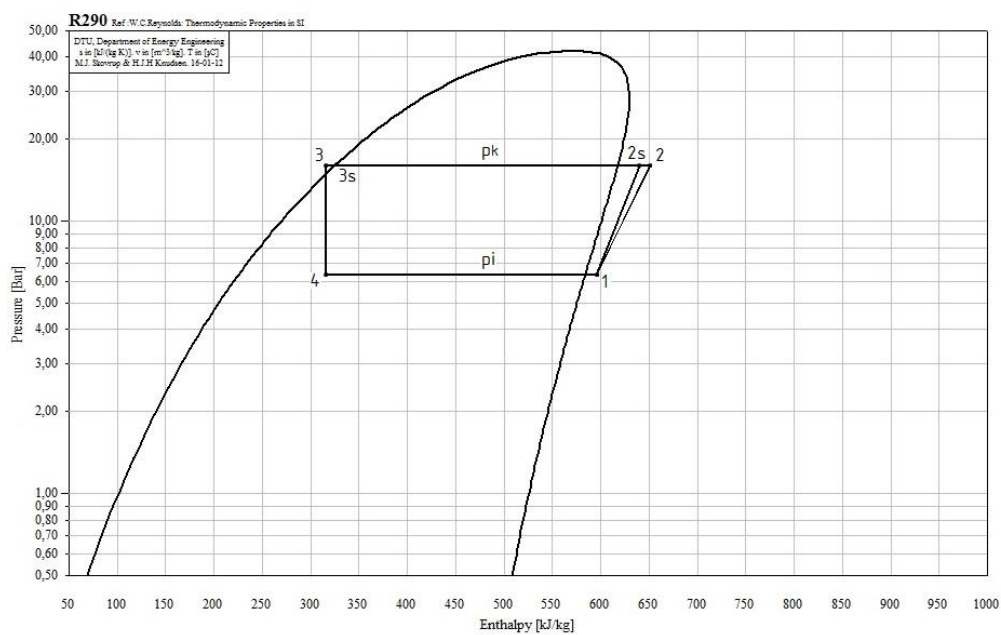
$$COP = \frac{\Phi_o}{P_k} = \frac{2,5}{0,557} = 4,49$$



### 5.1.2. Proračun sustava s propanom (R-290)



Slika 40 T – s dijagram za R-290 [13]



Slika 41 log p – h dijagram za R-290 [13]

Točka	Temp.	Tlak	Gustoća	Entalpija	Entropija
	(°C)	(bar)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kJ/kg)	(kJ/kgK)
1	16	6,4	13,41	594,4	2,39
2s	57,4	16,04	34,78	641,13	2,39
2	63,3	16,04	31,87	656,7	2,45
3s	47	16,04	454,3	326,3	2,33
3	44	16,04	460	317,5	1,39
4	10	6,4	48,9	317,5	1,41

**Tablica 10 Svojstva propana (R-290) za odabrane temperature [14]**

$$q_m = \frac{\Phi_o}{h_1 - h_4} = \frac{2,5}{594,4 - 317,5} = 0,009 \text{ (kg/s)}$$

$$P_k = q_m \cdot (h_2 - h_1) = 0,009 \cdot (656,7 - 594,4) = 0,561 \text{ (kW)}$$

$$\Phi_k = \Phi_i + P_k = 2,5 + 0,56 = 3,061 \text{ (kW)}$$

$$\frac{h_{2s} - h_2}{h_2 - h_1} = 0,75$$

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_2}{0,75} = 656,7 \text{ (kJ/kg)}$$

$$r = h_1 - h_4 = 594,4 - 317,5 = 276,9 \text{ (kJ/kg)}$$

$$\frac{p_k}{p_i} = \frac{16,04}{6,4} = 2,5$$

$$q_{ov} = \rho_1 \cdot r = 13,41 \cdot 276,9 = 3713,23 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

$$Q_{ov} = \rho_1 \cdot (h_{2s} - h_1) = 13,41 \cdot (641,13 - 594,4) = 626,65 \text{ (kJ/m}^3\text{)}$$

$$COP = \frac{\Phi_o}{P_k} = \frac{2,5}{0,561} = 4,46$$

**5.2. Usporedba radnih karakteristika propana (R-290) i R-22**

Radna tvar	R-22	Propan
Specifična toplina isparivanja (kJ/kg)	158,7	276,9
Gustoća na ulazu u kompresor (kg/m <sup>3</sup> )	27,8	13,41
Protok radne tvari qm (kg/s)	0,016	0,009
Kompresijski omjer	2,66	2,5
Volumetrički rashladni učin (kJ/m <sup>3</sup> )	4411,86	3713,23
Volumetrička potrošnja energije (kJ/m <sup>3</sup> )	725,6	626,65
Temperatura na izlazu iz kompresora (°C)	79,3	63,3
COP	4,49	4,46

**Tablica 11 Izračunate radne karakteristike propana (R-290) i R-22**

## 6. TROŠKOVNIK

Redni broj	Stavka	Količina	Cijena (kn)
1	Provedba tlačnog testa i testa čvrstoće	1	
2	Pražnjenje i punjenje sustava	1	
3	Ispitivanje propuštanja	1	
4	Demontaža i montaža sustava	1	
5	Radna tvar (propan)	0,24 kg	
6	Detekcijski/ventilacijski/alarmni sustav	1	
7	Hermetički zatvoreno kućište	1 kom	
8	Naljepnice upozorenja	2 kom	
UKUPNO			

## **ZAKLJUČAK**

Propan se odlikuju izvrsnim termofizikalnim svojstvima i odlična je zamjenska radna tvar za R-22 ali se zbog svoje zapaljivosti preporučuje rabiti samo u manjim dobro brtvljenim sustavima s malom količinom radne tvari, kao što su hladnjaci za kućanstvo i komercijalnu uporabu, dizalice topline i hladnjače kod kojih je moguće kontrolirati zdravstvene i sigurnosne rizike. Kada su ispunjeni zakonom propisani uvjeti za sigurnost propana je idealna radna tvar za takve jedinice. Može se koristiti s postojećim komponentama i sustavom, dobro se miješa s mineralnim uljima što uzrokuje niže temperature na kraju kompresije i ima 15 do 20 posto bolju energetska učinkovitost u odnosu na R-22. Kompresijski omjer i razlike tlakova su niže nego kod R-22 što rezultira nižom razinom buke.

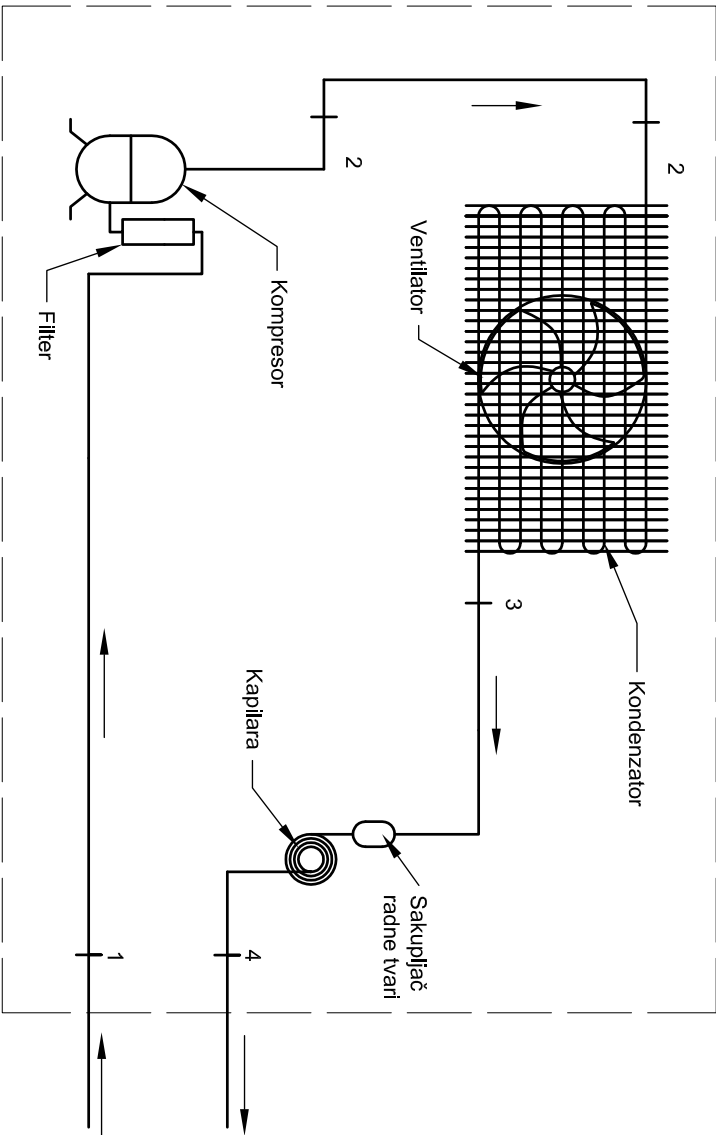
## LITERATURA

- [1]. Soldo V, Ćurko T.: Podloge za predavanje Hlađenje i dizalice topline, Zagreb, 2011.
- [2]. V. Soldo, M.Grozdek: Podloge za predavanje Projektiranje rashladnih sustava, Zagreb,
- [3] Operation of split air conditioning systems with hydrocarbon refrigerant, A conversion guide for technicians, trainers and engineers, Part I, giz-Proklima, Eschborn, 2011.
- [4] Operation of split air conditioning systems with hydrocarbon refrigerant, A conversion guide for technicians, trainers and engineers, Part II, giz-Proklima, Eschborn, 2011.
- [5] Mihaela Berković-Šubić, Projekt Pe, Ukljikovodične radne tvari
- [6] Natural refrigerants, Sustainable ozone and climate-friendly alternatives to HCFCs, GTZ-Proklima, Eschborn, 2008.
- [7] HRN EN378:2012 Rashladni sustavi i dizalice topline -- Zahtjevi s obzirom na okoliš i sigurnost – 1-4. Dio
- [8] Guidelines for the safe use of hydrocarbon refrigerants, gtz Proklima, Eschborn, 2010.
- [9] Natural refrigerants, Sustainable ozone and climate-friendly alternatives to HCFCs, GTZ-Proklima, Eschborn, 2008.
- [10] Zavod za istraživanje i razvoj sigurnosti, <http://www.zirs.hr/znakovi-sigurnosti.aspx>
- [11] Priručnik za energetska certifikacija zgrade, 2010.
- [12] Good Practices in Refrigeration, Eschborn, 2010.
- [13] CoolPack softvera
- [14] Coolselector2 softver, Danfoos

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Shema rashladnog sustava s R-22
- III. Shema rashladnog sustava s propanom

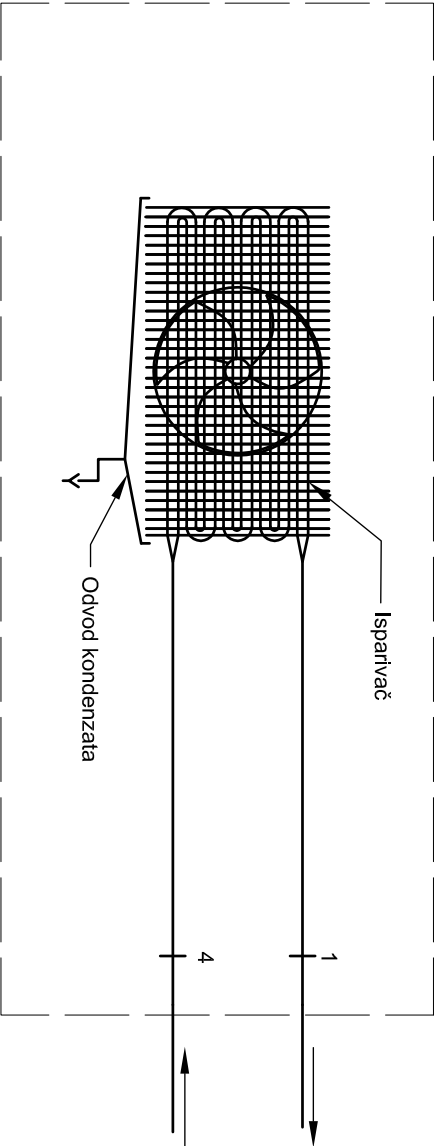
Vanjska jedinica



Točke procesa

Točka	Temp. (°C)	Tlak (bar)	Entalpija (kJ/kg)	Entropija (kJ/kgK)
1	16	6,8	413,6	1,75
2	79,3	18,12	448,4	1,8
3	44	18,12	254,9	1,18
4	10	6,8	254,9	1,19

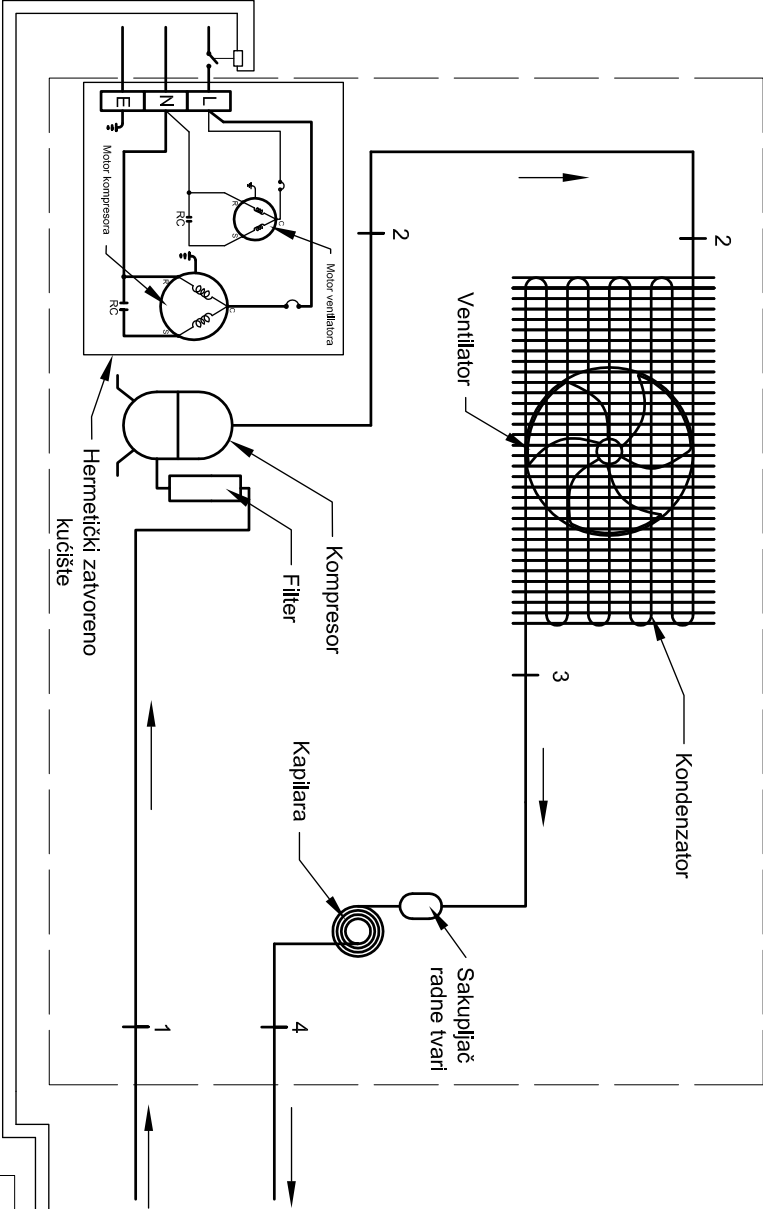
Unutarnja jedinica



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb	
Razradio					
Crtao		Matej Kraljinović			
Pregledao					
Objekt:				Objekt broj:	
Napomena:				R. N. broj:	
Materijal:	Masa:			Kopija	
Mjerilo:	Naziv:	Shema sustava s propanom		Pozicija:	
				Format: A3	
				Listova: 2	
				List: 1	



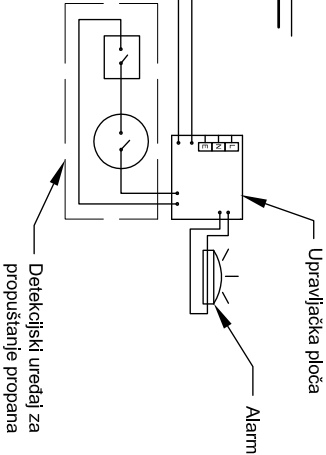
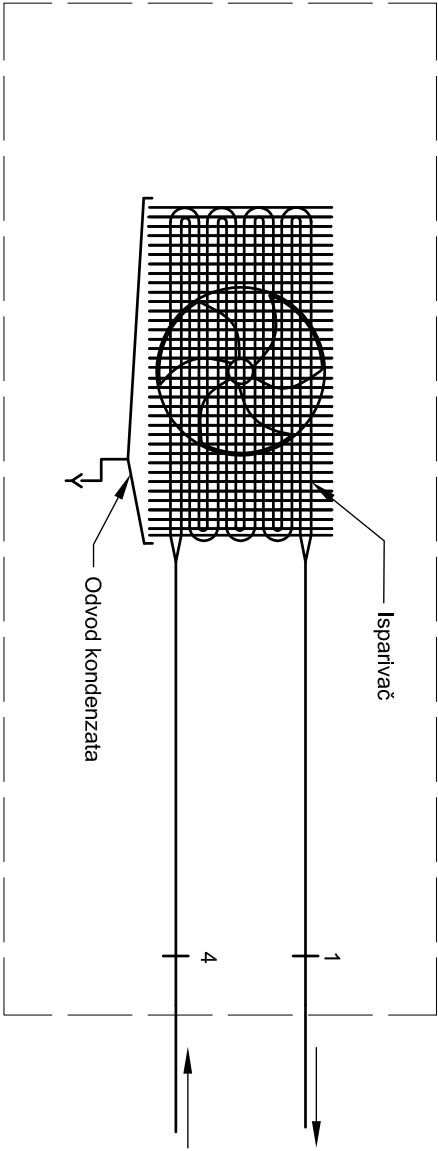
Vanjska jedinica



Točke procesa

Točka	Temp. (°C)	Tlak (bar)	Entalpija (kJ/kg)	Entropija (kJ/kgK)
1	16	6,4	594,4	2,39
2	63,3	16,04	656,7	2,45
3	44	16,04	317,5	1,39
4	10	6,4	317,5	1,41

Unutarnja jedinica



Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb
Razradio				
Crtao		Matej Kraljinović		
Pregledao				
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa:		
Mjerilo:				
Naziv: Shema sustava s propanom				Pozicija:
Crtež broj: 0035185520-002				Format: A3
				Listova: 2
				List: 2